



Elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa a partir de la modelación de respuesta hidrológica en cuencas

Francisco Javier Salas Torres

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C, Colombia

2018

Elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa a partir de la modelación de respuesta hidrológica en cuencas

Francisco Javier Salas Torres

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director (a):

Ph.D. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Línea de Investigación:

Taludes, laderas, cauces y zonificación geotécnica.

Áreas de Investigación:

Análisis de confiabilidad y riesgos asociados al entorno geotécnico

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C, Colombia

2018

A mi madre, quien me lo ha dado todo...

A mi compañera del camino...

Agradecimientos

A continuación, se presentan los agradecimientos a todas las personas y organizaciones que hicieron posible en algún momento el desarrollo de este trabajo.

A la ingeniera Lizeth Abril Cabrera, quien me brindó su ayuda y soporte a lo largo del desarrollo del presente trabajo, no sólo en temas técnicos, sino también en los personal pues es con quien feliz comparto mis días.

Al profesor Carlos Eduardo Rodríguez Pineda, quien dirigió el presente trabajo y planeó las estrategias necesarias para solucionar las incógnitas en el proceso de investigación, mostrando siempre su disposición en los temas tratados y en el avance del conocimiento.

A mi familia que siempre me alentó y apoyó en todo el proceso de elaboración del presente trabajo y en toda mi formación académica.

A la empresa CONSUAS Ingeniería de la ciudad de Manizales, quienes brindaron el soporte técnico y de movilidad en la visita de reconocimiento de campo a la cuenca de estudio.

A la Fundación CEIBA y al departamento de Nariño, quienes me brindaron apoyo económico en un tiempo de estudio del programa posgrado, permitiendo adentrarme en el conocimiento de los temas de investigación.

Al ingeniero Oscar Correa Calle, quien compartió información base para el proyecto, como los inventarios de deslizamientos levantados a partir de los trabajos en el POMCA del río Chinchiná y quien infundió en mí el gusto por el tema.

A la ingeniera Adela Londoño del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, directora del proyecto POMCA del río Chinchiná y quien me brindó acceso a los mapas temáticos e información requerida para la realización de los análisis de susceptibilidad.

A la profesora Gloria Beltrán, coordinadora del programa curricular del posgrado, quien con su oportuna gestión brindó el soporte necesario en términos de los recursos de la Universidad para el desarrollo de las actividades académicas a lo largo de todo el proceso.

A los ingenieros Julián Sánchez y Alexander Pachón, del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, quienes operan la red meteorológica de Manizales y Caldas, los cuales aportaron los datos de las series de registros históricos disponibles de las estaciones aferentes a la cuenca de estudio. También a la ingeniera Jenny Marín quien me compartió sus experiencias en la modelación climatológica de la cuenca del río Chinchiná, tema de su tesis de maestría.

Al ingeniero Diego Patiño, quien compartió sus experiencias y resultados en la elaboración de los mapas de cobertura del terreno y el análisis multitemporal de imágenes satelitales, para definir el factor condicionante de cambio en la cobertura, usado en los análisis de susceptibilidad.

A las plataformas de información de acceso libre entre las cuales se agradece a los "© Colaboradores de OpenStreetMap", Google Earth, Sentinel-2 y ALOS PALSAR de donde se obtuvieron importantes volúmenes de información, utilizadas en los análisis de amenaza.

A los grupos que operan y mantienen los softwares libres de sistemas de información geográfica QGIS y SAGA, quienes brindan herramientas gratuitas y potentes para el análisis de información y el desarrollo de este tipo de estudios.

A mis amigos y colegas que me brindaron alguna idea o comentario en el tema tratado, o simplemente un saludo de motivación, ampliando mi perspectiva y motivación en la investigación.

Resumen

Se presenta una metodología para la elaboración de mapas de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000. Los mapas de amenaza se obtienen de la combinación de los factores condicionantes y detonantes de inestabilidad con el inventario de deslizamientos que es la base para los análisis.

Se propone una metodología detallada para la construcción del inventario de deslizamientos a partir del análisis visual de imágenes, además del desarrollo de la aplicación móvil (LandSlide Collector V0) para la recolección de información de deslizamientos en campo.

Los factores condicionantes se obtienen de información temática y del modelo de elevación digital (DEM) para construir Índices de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) que representan las combinaciones de los factores. Se aplica el método de pesos de evidencia (WofE) que determina la correlación de cada clase de los factores respecto al inventario. Los LSI se evalúan con curvas de éxito que describen el nivel de representación para las zonas inestables.

Como factor detonante se analiza el efecto de la precipitación constante en las laderas, de acuerdo al Índice Topográfico de Humedad (TWI) y al Déficit de Humedad del Suelo (SMD) propuestos en el modelo hidrológico TOPMODEL. Se combinan los factores condicionantes con los detonantes para obtener el mapa de amenaza por deslizamientos. Se presenta la aplicación de la metodología propuesta en la cuenca de la quebrada El Rosario ubicada en la zona rural del municipio de Manizales.

Palabras clave: mapas de amenaza por deslizamientos, zonificación de amenaza, pesos de evidencia, inventario de deslizamientos, susceptibilidad a deslizamientos,

índice de topográfico de humedad, déficit de humedad del suelo, mapa de densidad de deslizamientos.

Abstract

The aim of this thesis is development of a methodology for landslide hazard maps at scale of 1: 25,000. The hazard maps are obtained from the combination of the conditioning and detonating factors of the instability and the landslide inventory.

A detailed methodology is proposed to make a landslide inventory based on the visual analysis of images, as well as the development of the mobile application (LandSlide Collector V0) for the register of landslide information in the field.

The conditioning factors are obtained from thematic information and the digital elevation model (DEM) to make Landslide Susceptibility Indexes (LSI) that represent the combinations of the factors. The weight of evidence method (WofE) is applied, which determines the correlation of each class of factors respect to inventory. The success rate curves are used to validate LSI.

As a detonating factor, the effect of constant precipitation on the slopes is analyzed, according to the Topographic Wetness Index (TWI) and the Soil Moisture Deficit (SMD) proposed in the hydrological model TOPMODEL. The conditioning and detonating factors are combined to obtain the landslide hazard map. As case study the methodology was implemented at basin of El Rosario stream, located in the rural area of Manizales.

Keywords: landslide hazard maps, landslide, hazard zoning, weights of evidence, landslide inventory, landslide susceptibility, topographic wetness index, soil moisture deficit, landslide density map.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas	XVIII
Lista de abreviaturas.....	XX
Introducción	21
1. Descripción del problema, justificación y terminología	24
1.1 Descripción del problema	24
1.2 Justificación	26
1.3 Definiciones y terminología.....	27
2. Objetivos y alcances	30
2.1 Objetivo general.....	30
2.2 Objetivos específicos	30
2.3 Alcances	30
3. Antecedentes y marco conceptual.....	32
3.1 Gestión del Riesgo	32
3.2 Análisis de amenaza por procesos de remoción en masa a escala 1:25.000.....	34
3.2.1 Zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa	34
3.2.2 Determinación de la amenaza por proceso de remoción en masa	35
3.2.3 Inventario de procesos de remoción en masa	42
4. Propuesta metodológica para la elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa a escala 1:25.000 en cuencas	53
4.1 Escalas de trabajo, unidad mínima cartografiable y unidad de análisis.....	55
4.2 Cartografía base	59
4.3 Metodología para el levantamiento del inventario de procesos de remoción en masa	60
4.3.1 Hipótesis para la realización del inventario mediante la metodología propuesta	61
4.3.2 Unidades de inspección visual para la identificación de procesos	62
4.3.3 Indicadores visuales para identificación y localización de procesos	65
4.3.4 Registro de procesos de remoción en masa identificados	66
4.3.5 Evaluación multitemporal de procesos identificados	70

4.3.6	Caracterización geométrica y vectorización de procesos de remoción en masa	71
4.3.7	Ficha final de detección y registro de procesos.....	73
4.3.8	Validación del inventario de deslizamientos en campo	74
4.3.9	Landslide Collector V0.0	75
4.4	Definición de los factores condicionantes de susceptibilidad a inestabilidad	81
4.4.1	Morfometría	82
4.4.2	Geología.....	94
4.4.3	Cambio en la Cobertura del Terreno y Uso del Suelo	96
4.4.4	N Factores Condicionantes Adicionales.....	106
4.5	Análisis de susceptibilidad del terreno a procesos de inestabilidad	106
4.5.1	Modelo de estabilidad de laderas mediante método de pesos de evidencia (WofE).....	107
4.5.2	Combinación de variables que representan inestabilidad	111
4.5.3	Zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa	112
4.5.4	Mapa de densidad de deslizamientos	113
4.6	Definición del factor detonante de inestabilidad: Precipitación.....	116
4.6.1	TOPMODEL	116
4.7	Zonificación y Análisis de amenaza por procesos de remoción en masa.....	119
5.	Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario a escala 1:25.000.....	121
5.1	Obtención de información antecedente y cartografía base	122
5.2	Inventario de procesos de remoción en masa para la cuenca	123
5.3	Visita de reconocimiento de campo	125
5.4	Factores condicionantes de inestabilidad para la cuenca de estudio.....	128
5.4.1	Morfometría	128
5.4.2	Geología.....	133
5.4.3	Cambio en la Cobertura del Terreno y Uso del Suelo	141
5.4.4	Factor N – Clasificación agrológica de suelos.....	152
5.5	Susceptibilidad a movimientos en masa de la cuenca.....	156
5.5.1	Análisis de pesos de evidencia individuales para cada factor condicionante.....	156
5.5.2	Combinaciones de factores condicionantes (Índices de Susceptibilidad a Deslizamientos - LSI)	159
5.5.3	Análisis de los Índices de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) obtenidos	160
5.5.4	Mapa de densidad de deslizamientos para la cuenca (Landslide Isopleth Maps)	164
5.5.5	Mapa de susceptibilidad para la cuenca de la quebrada El Rosario..	168
5.6	Modelación de respuesta hidrológica como detonante de la amenaza por procesos de remoción en masa	169
5.6.1	Información hidroclimatológica para la cuenca de la Quebrada El Rosario	169
5.6.2	Aplicación del modelo hidrológico propuesto	172
5.6.3	Pesos de evidencia para el factor detonante de inestabilidad	176
5.6.4	Determinación de la influencia de las variables TWI y SMD en la representatividad de zonas inestables	178
5.7	Evaluación de la amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca	179

5.7.1	Índices de Amenaza por Deslizamiento (LHI) para la cuenca.....	179
5.7.2	Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario	180
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	183
6.1	Conclusiones	183
6.1.1	Conclusiones generales de la metodología propuesta	183
6.1.2	Conclusiones de la aplicación de la metodología en la cuenca de la quebrada El Rosario.....	186
6.2	Recomendaciones	186
A.	Anexo: Inventario de deslizamientos levantado con la metodología propuesta para la cuenca de la quebrada El Rosario	189
B.	Anexo: Visita de reconocimiento de campo.....	195
C.	Anexo: Curva de éxito para la clasificación de amenaza de la cuenca de la Quebrada El Rosario	221
D.	Anexo. Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario.....	227
	Bibliografía	229

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Vista aérea sobre Mocoa, tras avenida torrencial en 2017.....	25
Figura 3-1. Ubicación temática del presente estudio en el marco de referencia para evaluación de riesgo por movimientos en masa.....	33
Figura 3-2. Mapa de procesos de remoción en masa de una zona en Estados Unidos...	46
Figura 4-1. Diagrama de flujo de la propuesta metodológica para la elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa.	54
Figura 4-2. Descripción de funcionamiento para la herramienta de análisis de vecindades en SIG.	58
Figura 4-3. Comparación de las diferentes unidades de inspección visual para deslizamientos, a la derecha la malla con apertura de 2000 m y a la izquierda en amarillo la de 500 m x 500 m.....	63
Figura 4-4. Detalle de la malla de inspección de 500 m en una zona al sur de la ciudad de Manizales.....	64
Figura 4-5. Vista de la malla de 500mX500m, para la cuenca de la quebrada El Rosario, se distingue el punto de salida de cuenca, para que se estime la dirección del flujo.....	64
Figura 4-6. Pestaña de edición de una nueva Marca de Posición en el visor de Google Earth Pro.....	69
Figura 4-7. Herramienta de Imágenes Históricas de Google Earth Pro.	71
Figura 4-8. Detalle de la herramienta Regla, en rojo se resaltan las sub-herramientas más utilizadas para la caracterización geométrica de un proceso de remoción en masa.....	72
Figura 4-9. Portabilidad de información y herramientas para el trabajo de campo en la validación del inventario de deslizamientos.....	76
Figura 4-10. Inicio de aplicación y registro de información base.	77
Figura 4-11. Creación del registro de deslizamientos.....	77
Figura 4-12. Registro información del deslizamiento.....	78
Figura 4-13. Aspectos del levantamiento para un registro información del deslizamiento	79
Figura 4-14. Utilidades de sensores en equipos celulares dentro de LandSlide Collector V0.0	79
Figura 4-15. Ayudas visuales de validación diligenciamiento de información	80
Figura 4-16. Producto final de LandSlide Collector Versión 0.0.....	81
Figura 4-17. Mapa de aspecto sin clasificar, obtenido a partir del DEM.	83
Figura 4-18. Mapa de aspecto clasificado a partir de estadísticas focalizadas en SIG.	84
Figura 4-19. Metodología para la generación del mapa de aspecto usando SIG.....	85

Figura 4-20. Vista en Google Earth Pro de las laderas delimitadas con el mapa de aspecto.	86
Figura 4-21. Metodología para la generación del mapa de pendientes usando SIG.	88
Figura 4-22. Descripción del cálculo de Curvatura usando SIG.	89
Figura 4-23. Representación gráfica de la curvatura en planta.	90
Figura 4-24. Representación gráfica de la posible simetría de una serie de datos,	91
Figura 4-25. Metodología para la generación del mapa de curvatura usando SIG.	92
Figura 4-26. Mapa de curvatura sin clasificar obtenido a partir del DEM.	93
Figura 4-27. Mapa de curvatura clasificado a partir de la propuesta descrita.	94
Figura 4-28. Metodología para la elaboración de los mapas de cambio de cobertura y usos del suelo.	97
Figura 4-29. Metodología para la generación de la capa de cambio de cobertura de la tierra.	101
Figura 4-30. En la parte izquierda se presenta la relación general entre el inventario de deslizamientos y un factor condicionante. En la derecha se presenta en el diagrama de Venn en el que se resume la relación de traslapo entre el factor condicionante y el inventario.	108
Figura 4-31. Representación gráfica de las posibles combinaciones entre un factor condicionante y las zonas inestables.	110
Figura 4-32. Ejemplo de categorización de la curva de éxito, para la susceptibilidad alta, media y baja. SGC (2017)	113
Figura 4-33. Procedimiento general para la elaboración de mapas de densidad de deslizamiento.	114
Figura 4-34. Comparación de espaciamentos de mallas y diámetros de circunferencias	115
Figura 4-35. Conceptualización vertical del modelo hidrológico TOPMODEL (Izq) y descripción gráfica de la influencia topográfica en el aporte de flujo desde agua arriba (Dch).	117
Figura 5-1. Localización de la cuenca de la quebrada El Rosario.	122
Figura 5-2. Inventario de movimientos en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario.	124
Figura 5-3. Vista general de la cuenca, viaducto La Estampilla, cultivos de café, plátano y cultivos de cítricos.	126
Figura 5-4. Obras de contención en algunos sitios de la cuenca.	127
Figura 5-5. Mapa de aspecto clasificado para la cuenca en estudio.	129
Figura 5-6. Mapa de pendientes clasificada para la cuenca en estudio.	130
Figura 5-7. Mapa de curvatura en planta clasificado para la cuenca de la quebrada El Rosario.	132
Figura 5-8. Mapa de geología de la cuenca de la quebrada EL Rosario.	134
Figura 5-9. Cambio en la superficie de bosque natural para la cuenca en el periodo 2016 – 2015.	142
Figura 5-10. Comparación de imágenes respecto de la calidad de visualización de la información.	143

Figura 5-11. Muestra de tres combinaciones de bandas en el modelo RGB para la identificación de coberturas de la tierra para la cuenca de la quebrada El Rosario.	144
Figura 5-12. Mapa de Cobertura de la Tierra en el tiempo actual CCT-t1, para la cuenca de la quebrada El Rosario.....	145
Figura 5-13. Mapa de Cobertura de la Tierra en el tiempo anterior CCT-t0, para la cuenca de la quebrada El Rosario.....	146
Figura 5-14. Mapa de cambio de cobertura del terreno para la cuenca de la quebrada El Rosario.	150
Figura 5-15. Mapa de uso del suelo para la cuenca en estudio.....	151
Figura 5-16. Mapa de clasificación agrológica del suelo para la cuenca de la Quebrada El Rosario.	153
Figura 5-17. Curvas de éxito para todos los LSI obtenidos.	160
Figura 5-18. Mapas de susceptibilidad de acuerdo a los índices de susceptibilidad obtenidos. LSI 1 (superior izquierda), LSI 2 (superior derecha), LSI 3 (inferior izquierda), LSI 4 (inferior derecha).	162
Figura 5-19. Mapas de susceptibilidad de acuerdo a los índices de susceptibilidad obtenidos. LSI 5 (superior izquierda), LSI 6 (superior derecha), LSI 7 (media izquierda), LSI 8 (media derecha), LSI 9 (inferior izquierda), LSI 10 (inferior derecha).	163
Figura 5-20. Mapa de densidad de deslizamientos, mediante el método de interpolación IDW.....	164
Figura 5-21. Detalle del mapa de densidad de deslizamiento para la cuenca en estudio.	165
Figura 5-22. Comparación entre los mapas de densidad de deslizamientos y los mapas de susceptibilidad. LSI 2 (superior izquierda), LSI 6 (superior derecha), LSI 8 (inferior izquierda), LSI 10 (inferior derecha).	166
Figura 5-23. Comparación entre los valores de LSI, respecto al mapa de densidad de deslizamientos.	167
Figura 5-24. Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa definido para la cuenca de estudio a partir del LSI 6.	168
Figura 5-25. Estaciones hidroclimatológicas para la cuenca de estudio.....	170
Figura 5-26. Serie de precipitación y evapotranspiración para el año 2014 de la estación principal Alcázares.	171
Figura 5-27. Mapa de Índice Topográfico de Humedad (TWI) para la cuenca de estudio.	172
Figura 5-28. Vista detallada de la clasificación realizada para el TWI.	173
Figura 5-29. Vista detallada del mapa de Déficit de Humedad de Suelo.	174
Figura 5-30. Curvas de éxito de las variables TWI y SMD del modelo hidrológico TOPMODEL.....	178
Figura 5-31. Curvas de éxito para los Índices de Amenaza por Deslizamiento (LHI).....	180
Figura 5-32. Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario, clasificado en amenaza alta media y baja. A partir del LHI A.	181

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1. Relación entre de escalas, niveles de estudio y características de interés para zonificación de amenaza por movimientos en masa.	36
Tabla 3-2. Comparación de algunos sistemas de clasificación de deslizamientos.	38
Tabla 3-3. Clasificación de la precisión espacio-temporal de los registros de movimientos en masa.	39
Tabla 3-4. Tipos de movimientos en masa para el análisis de amenaza.	39
Tabla 3-5. Listado de factores causantes de procesos de remoción en masa.	41
Tabla 3-6. Actividades requeridas para la preparación de inventarios de deslizamientos.	43
Tabla 3-7. Propuesta para los campos que conforman un registro del inventario de movimientos en masa.	47
Tabla 3-8. Simbología sugerida para la cartografía temática del inventario de deslizamiento.	50
Tabla 4-1. Capacidad de representación del terreno de un punto de diferente tamaño a diferentes escalas.	57
Tabla 4-2. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a la calidad de la imagen y visibilidad.	67
Tabla 4-3. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a las formas, tonos de color e interpretación de imágenes.	67
Tabla 4-4. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a la textura observada en la imagen.	67
Tabla 4-5. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a los posibles detonantes físicos del proceso de inestabilidad.	68
Tabla 4-6. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a la evaluación multitemporal del sitio o proceso localizado.	68
Tabla 4-7. Nomenclatura para la clasificación de procesos de remoción en masa, clasificación propuesta por Cruden & Varnes 1998, adaptada en PMA:GCA (2007).	69
Tabla 4-8. Encabezados sugeridos para la ficha final de detección y registro de procesos de remoción en masa.	74
Tabla 4-9. Rangos de pendiente para el análisis de susceptibilidad por procesos de remoción en masa.	87
Tabla 4-10. Clasificación de cobertura mediante Corine Land Cover hasta nivel II asociada al uso del suelo.	98

Tabla 4-11. Clase de cambio por deforestación y priorización de las zonas para análisis multitemporal en la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.000.	102
Tabla 4-12. Descripción de las bandas del programa satelital Sentinel – 2.	103
Tabla 4-13. Combinación de bandas sugeridas para la interpretación de coberturas. ...	104
Tabla 5-1. Resumen del inventario de deslizamientos por tipo de deslizamiento para la cuenca de la quebrada El Rosario.	123
Tabla 5-2. Resumen del aspecto para la cuenca de la quebrada El Rosario.	129
Tabla 5-3. Análisis de pesos de evidencia para la variable Aspecto, de acuerdo a las clases propuestas.	130
Tabla 5-4. Resumen del factor pendiente para la cuenca de la quebrada El Rosario. ...	131
Tabla 5-5. Análisis de pesos de evidencia para la variable Pendiente, de acuerdo a las clases propuestas por Van Zuidam (1987).	131
Tabla 5-6. Resumen del factor curvatura para la cuenca de la quebrada El Rosario.	132
Tabla 5-7. Análisis de pesos de evidencia para la variable curvatura para las siete clases definidas.	133
Tabla 5-8. Resumen de las clases del factor geología para los análisis de susceptibilidad.	140
Tabla 5-9. Análisis de pesos de evidencia para el factor geología.	140
Tabla 5-10. Codificación y análisis del cambio en la cobertura de la tierra, en el periodo de análisis para el área de estudio.	147
Tabla 5-11. Matriz de Persistencia, Pérdida y Ganancia de coberturas para la cuenca de la quebrada El Rosario.	149
Tabla 5-12. Resultados del análisis de pesos de evidencia para la variable Cambio en la Cobertura del terreno.	151
Tabla 5-13. Análisis de pesos de evidencia para la variable uso del suelo.	152
Tabla 5-14. Descripción agrológica de los suelos encontrados en la zona de estudio. ...	153
Tabla 5-15. Resultado del análisis de pesos de evidencia para la clasificación de suelo agrológico.	156
Tabla 5-16. Pesos de evidencia de mayor a menor para cada clase de todos los factores.	157
Tabla 5-17. Combinaciones de factores realizada para la cuenca de estudio.	159
Tabla 5-18. Bondad de representación para cada LSI calculado.	161
Tabla 5-19. Coeficiente de correlación R para la parábola de tendencia ajustada.	167
Tabla 5-20. Características de las estaciones con influencia a la cuenca en estudio. ...	170
Tabla 5-21. Influencia del cambio en la precipitación en el Déficit de Saturación del Suelo.	175
Tabla 5-22. Pesos de evidencia para la variable TWI de la cuenca en estudio.	176
Tabla 5-23. Pesos de evidencia para la variable SMD de la cuenca en estudio.	177

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIG	Sistemas de Información Geográfica
OSGeo	The Open Source Geospatial Foundation
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
GRASS	GRASS GIS
WoE	Weights of Evidence - Pesos de evidencia
PMA	Proyecto Multinacional Andino
UGS	Unidades Geológicas Superficiales
LSI	Índice de Susceptibilidad a Deslizamiento
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
PRM	Procesos de Remoción en Masa
DEM	Modelo de Elevación Digital
IDEA	Instituto de Estudios Ambientales
CCT-t0	Capa de Cobertura de la Tierra en el Tiempo Anterior
AGS	Australian Geomechanics Society
UN	Naciones Unidas
TWI	Topographic Wetness Index
SMD	Déficit de Saturación del Suelo
LHI	Índice de Amenaza por Deslizamiento
POMCA	Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca Hidrográfica

Introducción

Los procesos de remoción en masa se presentan cada cierto periodo de tiempo debido a factores detonantes de inestabilidad y a la misma disposición del terreno a moverse, afectando en algunas ocasiones la vida, los bienes y la infraestructura de las comunidades que viven en zonas de laderas o en influencia de éstas.

En este documento se presenta una propuesta metodológica para la zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa a escala 1:25.000. En la metodología se describe la espacialización de la precipitación como factor detonante de inestabilidad. Además, se detallan los procesos de adquisición, manipulación, procesamiento y análisis de la información temática requerida para los estudios de amenaza teniendo en cuenta algunos lineamientos bases propuestos en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1: 25.000 del Servicio Geológico Colombiano (2017).

Para la determinación de la amenaza a escala regional se requiere de un inventario de deslizamientos que corresponde a la variable objetivo o de agrupamiento para los análisis de estabilidad mediante el modelo estadístico de Pesos de Evidencia (WofE) aplicado en el presente trabajo. El modelo estadístico describe el grado de representatividad o peso de cada clase de un mismo factor condicionante y detonante. Se basa en la evidencia de inestabilidad que a futuro puede ocurrir en condiciones similares al pasado y presente.

Es difícil contar con un inventario completo únicamente a partir de información secundaria, debido a esto se presenta una metodología para el levantamiento del inventario deslizamientos mediante el análisis visual de imágenes satelitales y su validación en campo mediante la aplicación móvil LandSlide Collector v0 desarrollada en el marco del presente trabajo.

La aplicación LandSlide Collector v0 constituye una herramienta que permite la caracterización de los procesos de remoción en masa en campo, de acuerdo a lo propuesto en el formato para el levantamiento del inventario de movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (2016), el cual es modificado para Colombia del propuesto en el documento: Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas del Proyecto Multinacional Andino (PMA:GCA). La aplicación permite la captura y almacenamiento de información de movimientos en masa de manera eficiente, permitiendo realizar un inventario de calidad.

Para los análisis de amenaza se hace uso de herramientas de software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) usadas para la adquisición, manipulación y procesamiento de la información temática. Los softwares utilizados fueron: QGIS, SAGA y ArcGIS, siendo los dos primeros de uso libre.

Los factores condicionantes de inestabilidad propuestos para el análisis de susceptibilidad mediante Pesos de Evidencia (WofE) corresponden como mínimo a los mapas de: aspecto, pendiente, curvatura, geología, cambio de cobertura del terreno, uso del suelo. Otros factores pueden ser evaluados siendo validados por el analista de amenazas y de acuerdo a la información disponible, siendo una de las ventajas del método empleado.

Los Pesos de Evidencia (WofE) de cada factor se combinan con otros factores obteniendo un Índice de Susceptibilidad a Deslizamiento (LSI), la combinación se hace mediante la suma de los pesos hallados, entre mayor sea el valor, mayor será el grado de representatividad de zonas inestables de una determinada combinación de factores. La bondad de representación de cada LSI se analiza mediante la construcción de curvas de éxito que define la proporción de representación de cada combinación de factores.

Tantos mapas de susceptibilidad pueden ser generados como Índices de Susceptibilidad a Deslizamientos sean definidos, sin embargo, se requiere determinar un solo mapa de susceptibilidad para la cuenca. Para la selección del mapa de susceptibilidad se validan las combinaciones realizadas con el mapa de densidad de deslizamientos (Isopleths), siendo una variable continua que brinda la idea del grado de estabilidad general de la

cuenca de acuerdo al mismo inventario de deslizamientos. Permitiendo la selección de un único mapa de susceptibilidad.

El factor detonante de inestabilidad estudiado en el presente trabajo es la precipitación, siendo el principal detonante de movimientos en masa en la región tropical-andina. Se presenta una propuesta para la espacialización del efecto de la precipitación en los análisis de amenaza, modelando el Déficit de Saturación del Suelo (SMD) descrito en el modelo hidrológico distribuido TOPMODEL y asociado al Nivel de Aguas Freáticas (NAF). El modelo permite analizar el aporte de flujo de las áreas aguas arriba pues incorpora el Índice Topográfico de Humedad (TWI), brindando una idea del comportamiento del agua en las laderas.

El Déficit de Saturación del Suelo (SMD) se incorpora con el Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) mediante pesos de evidencia obteniendo un Índice de Amenaza por Deslizamientos (LHI), a partir del cual se definen las zonas de amenaza alta, media y baja de acuerdo a la curva de éxito obtenida.

Se presenta la aplicación de la metodología en la cuenca de la quebrada El Rosario, que hidrográficamente es una subcuenca de la cuenca del río Chinchiná tributario a su vez del río Cauca. La cuenca de la quebrada El Rosario pertenece al municipio de Manizales en el departamento de Caldas, su importancia radica en que sobre la cuenca se encuentran importantes desarrollos urbanos, infraestructura para la comunicación y corresponde a una posible zona de expansión urbana de la ciudad.

1.Descripción del problema, justificación y terminología

A continuación, se presentan las consideraciones generales sobre las que se enmarca el presente trabajo de tesis.

1.1 Descripción del problema

La población colombiana recurrentemente es afectada por diversos eventos excepcionales de tipo natural como: inundaciones, sismos, deslizamientos, flujos de tierras, avalanchas, entre otros, que impactan en la vida y la economía de las familias y del país.

La ocurrencia de eventos de movimientos en masa es producto de múltiples variables entre las que se encuentran: la posición geográfica, las condiciones intrínsecas del terreno y los materiales, los factores antrópicos y los eventos naturales detonantes de inestabilidad (lluvia y sismo) de magnitud incierta y cada vez más recurrentes, pero menos predecibles por la incertidumbre del ciclo hidrológico afectado por el cambio climático.

Por ejemplo, en el segundo trimestre de 2017 el país sufrió una serie de eventos de precipitación extremos en varios departamentos. En la Figura 1-1 se presenta una imagen de los rastros de la avenida torrencial ocurrida el 01 de abril de 2017 en Mocoa, en la que murieron aproximadamente 320 personas, una cantidad importante de desaparecidos y centenas de damnificados.



Figura 1-1. Vista aérea sobre Mocoa, tras avenida torrencial en 2017.

(Semana, 2017)

De la imagen se observan las viviendas afectadas por la avenida torrencial. Posiblemente la tragedia se hubiera evitado o reducido, si se restringía el uso del suelo cerca al cuerpo de agua, respetando la ronda hídrica mínima, criterio que debería estar descrito en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio que es el instrumento para el aprovechamiento adecuado del territorio.

Por otra parte, la ola invernal de 2010 y 2011 afectó por completo el país con la pérdida de casi 500 vidas e importante infraestructura en todo el territorio con un total de 3.68 millones de afectados aproximadamente, representando el 8% de la población total del país para el año 2011 (CEPAL, BID, & DNP, 2012).

Debido a lo anterior es evidente la afectación negativa que causa una temporada invernal en todo el país, que sumada con la falta de una adecuada y estricta política de planificación territorial dan como resultado centenares de muertes y millonarias pérdidas.

Aunque también existen otros factores sociales que suman en la ocurrencia de desastres como la falta de conocimiento de las zonas de alto riesgo, intereses de particulares para licenciamientos de construcción, valoraciones de predios, entre otros.

1.2 Justificación

El presente trabajo se justifica en la necesidad de herramientas para el ordenamiento del territorio a partir de políticas de gestión del riesgo, para lo cual se requiere determinar el riesgo que a su vez es la combinación de la vulnerabilidad y la amenaza, siendo el cálculo de la amenaza el objeto del presente estudio, teniendo en cuenta las directrices a nivel nacional en el tema.

A partir de la creación y operación del Fondo de Adaptación en respuesta a la temporada invernal 2010-2011, el gobierno nacional ha enfatizado en la importancia de los planes de gestión del riesgo en el país, creando la Ley 1523 de 2012 en la que se establece la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y otras disposiciones siendo el documento base de gestión del riesgo en el territorio nacional.

Por otra parte el Decreto 1807 de 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio describe los requerimientos técnicos para la evaluación de amenaza, de acuerdo a las escalas de trabajo (básica y detallada) enfocadas a los planes de ordenamiento territorial (POT), divididos para zonas urbana y rural (Decreto 1807, 2014).

En el tema de gestión del riesgo para cuencas hidrográficas, el Fondo de Adaptación propone el documento técnico: *Protocolo para la Incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCA de Acuerdo con los Alcances Técnicos del Proyecto* del año 2014, siendo complementario a la *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCA*. En ese documento se presenta la metodología para la estimación de la susceptibilidad y amenaza por procesos de remoción en masa en cuencas (Fondo Adaptación, 2014).

Aunque la evaluación de la susceptibilidad del terreno es realizada de manera estadística, utilizando el método de análisis discriminante, no se describe adecuadamente los procedimientos para la obtención del inventario de deslizamientos, siendo la base para el análisis estadístico.

El Servicio Geológico Colombiano presentó el documento *“Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000”* en noviembre de 2017, el cual pretende describir una metodología general para la elaboración de la zonificación de amenaza a dicha escala, sin embargo, no se ahonda en las posibilidades para el análisis del método de pesos de evidencia, ni tampoco se describen a fondo los factores condicionantes de morfometría. Respecto al detonante lluvia, no se presenta una propuesta definida de la influencia del nivel freático en la ocurrencia de movimientos en masa.

Debido a lo anterior se justifica proponer una metodología que permita definir adecuadamente el inventario de procesos de remoción en masa como base para los análisis a escala 1:25.000, además que permita definir adecuadamente las laderas a partir de características morfométricas y que brinde la idea espacial de la distribución del nivel freático.

También se presenta la utilización de herramientas de software y fuentes de información libre para la realización de los análisis, brindando una disminución en los costos de inversión en los estudios para municipios con limitados recursos. Buscando ser una herramienta para la creación o actualización de los POT municipales para las zonas rurales y para los POMCA.

1.3 Definiciones y terminología

Esta sección tiene como finalidad definir una terminología común para el tema del presente trabajo. Se presentan las definiciones propuestas por entidades del ámbito nacional (SGC) e internacionalmente aceptadas.

Gestión del riesgo: es el proceso completo de análisis de riesgo y control o tratamiento del riesgo (AGS, 2007b). De acuerdo con el Artículo 1 de la Ley 1523 de 2012, la gestión del riesgo se define como: un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (CONGRESO DE COLOMBIA, 2012). La gestión del riesgo es un tema central para sectores como el suministro de agua, la energía y la agricultura, cuya producción se ve directamente afectada por las condiciones ambientales extremas y el clima (UNISDR, 2009).

Riesgo: es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la salud, los bienes o al medio ambiente. El riesgo con frecuencia es estimado por el producto de la vulnerabilidad y la amenaza. Una interpretación más general del riesgo describe que no se puede comparar en forma de un producto general (AGS, 2007b), se debería evaluar en función del tipo de pérdidas.

- a. Para pérdidas de vidas, la probabilidad anual que la persona con mayor riesgo perdiera su vida teniendo en cuenta la amenaza por deslizamientos y su probabilidad temporal y espacial y la vulnerabilidad de la persona.
- b. Para pérdidas de bienes, la probabilidad anual de la consecuencia o la pérdida anual teniendo en cuenta los elementos en riesgo, su probabilidad espacial temporal y vulnerabilidad.

Amenaza: Hace referencia a una condición con el potencial para causar consecuencias indeseadas. La descripción de amenaza por deslizamientos debería incluir la localización, volumen (o área), clasificación y velocidad de los deslizamientos potenciales y la probabilidad de su ocurrencia dentro de un periodo de tiempo dado. La amenaza por deslizamientos incluye movimientos en masa que tienen su origen en un área determinada o aquellos que tienen su origen fuera de ella, pero la masa deslizada podría viajar progresivamente o retrogresivamente hasta el área de estudio.

El Servicio Geológico Colombiano define una amenaza natural como “un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. La caracterización de la amenaza debe incluir su ubicación, clasificación, magnitud o intensidad, y se evalúa en función de probabilidad de ocurrencia espacial y temporal. La magnitud o intensidad de la amenaza se puede expresar en términos de volumen, área, velocidad, intensidad o energía” (SGC & UNAL, 2016, p. 17).

Zonificación: es la división del terreno en áreas o dominios homogéneos y su clasificación según grados de actual y potencial susceptibilidad, amenaza o riesgo.

Elementos en riesgo: hace referencia a la población, las edificaciones, las actividades económicas, los servicios públicos, la infraestructura y las características ambientales para un área potencialmente afectada por la amenaza.

Susceptibilidad: corresponde a la evaluación cualitativa o cuantitativa de la vocación del terreno a la inestabilidad de acuerdo a las condiciones y características del mismo.

Procesos de remoción en masa: en general corresponden a movimiento de una masa de rocas, detritos o suelos ladera abajo.

Inventario de procesos de remoción en masa: es el registro sistemático de las características de varios procesos de remoción en masa como la localización, clasificación, volumen, actividad y fecha de ocurrencia, entre otros, para una determinada área de estudio.

2. Objetivos y alcances

A continuación, se encuentran los objetivos y el alcance del presente trabajo, que describen la estimación de la amenaza por procesos de remoción en masa a escala regional.

2.1 Objetivo general

Proponer una metodología para la elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa inducidos por lluvia a escala 1:25000.

2.2 Objetivos específicos

- Proponer una metodología para la evaluación de la susceptibilidad de laderas, generando un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa como insumo para la determinación de la amenaza.
- Implementar un modelo de respuesta hidrológica de laderas en sistemas de información geográfica.
- Proponer un modelo para determinar la estabilidad de laderas a partir de la susceptibilidad y la modelación de la respuesta hidrológica.
- Proponer una metodología para la zonificación de la amenaza con base al modelo de respuesta hidrológica y modelo de susceptibilidad.

2.3 Alcances

De acuerdo a los objetivos propuestos se define los límites de los análisis y productos de la investigación, que se describen a continuación:

- La escala de trabajo corresponde una escala media 1:25000, requerida en análisis de amenaza básicos para zonas rurales de acuerdo planes de ordenamiento como POT, PBOT y POMCA. Además, es aplicable para análisis de prefactibilidad de proyectos.

- El área de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica debido a las facilidades y utilidades que esta división natural de terreno brinda al entendimiento de los procesos naturales en términos de la definición de límites precisos.
- En la propuesta de la metodología para la evaluación de la susceptibilidad de laderas, se tiene en cuenta la *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000* del Servicio Geológico Colombiano. Buscando integrar nuevos conceptos con el trabajo más importante en dicha escala que se hecho a nivel nacional, queriendo avanzar un poco en el conocimiento base con que cuenta el país.
- Para el levantamiento del inventario de deslizamientos se presenta una metodología completa siendo uno de los productos principales del presente trabajo, pues es la información fundamental para los análisis de susceptibilidad y amenaza en la escala definida.
- Como factores condicionantes de inestabilidad del terreno se estudian los factores obtenidos a partir del modelo digital del terreno (DEM) definidos en el presente trabajo como morfometría (aspecto, pendiente y curvatura). Además, se analizan los factores descritos en la Guía del SGC 2017, en términos de metodologías para su elaboración y descripción de fuentes de información.
- Como factor detonante de inestabilidad se estudia la influencia espacial de la precipitación en el nivel freático de las laderas a partir del Déficit de Saturación del Suelo (SMD) y el Índice Topográfico de Humedad (TWI) descritos en el modelo hidrológico TOPMODEL compilado en el software SAGA 2.3.2. de sistemas de información geográfica usado para los análisis.
- El modelo de estabilidad de laderas es descrito a partir de la comparación de zonas inestables con los factores condicionantes y detonante, usando el método estadístico bivariado de Pesos de Evidencia (WofE), que define los pesos de cada clase de cada factor, buscando la clase y combinaciones de factores que mejor describan la inestabilidad del área de estudio.

3. Antecedentes y marco conceptual

A continuación, se presenta un marco conceptual general para el presente trabajo de tesis se presenta una descripción de la gestión de riesgo y luego se precisa sobre los análisis de amenaza por movimientos en masa.

3.1 Gestión del Riesgo

De acuerdo con lo planteado por Fell et al. (2005) la gestión del riesgo corresponde a la aplicación sistemática de políticas administrativas, procedimientos y prácticas para las tareas de identificación, análisis, evaluación, mitigación y monitoreo del riesgo, lo que sugiere la completa vinculación de todos los actores de la sociedad en la búsqueda de la adecuada gestión del riesgo ante eventos naturales.

El marco de referencia para la gestión del riesgo utilizado se presenta a continuación en la Figura 3-1, propuesto por (R. Fell, Ho, Lacasse, & Leroi, 2005) y citado por (AGS, 2007a), (AGS, 2007b), y (AGS, 2007c), (SGC & UNAL, 2016), (SGC, 2017), (Corominas et al., 2014) entre otros autores. A partir de éste se proponen metodologías de análisis para cada una de las etapas de la gestión del riesgo. En la Figura 3-1 se puede observar en el recuadro rojo la ubicación del presente trabajo dentro del marco de referencia de la gestión del riesgo, correspondiente a la etapa inicial de análisis de riesgo.

En el marco de referencia la gestión del riesgo se distinguen tres etapas principales: La primera consiste en el análisis del riesgo donde se obtiene la amenaza y la vulnerabilidad o consecuencias; la segunda tiene que ver con la evaluación del riesgo, de acuerdo con valores de juicio y criterios de riesgos tolerables; y la tercera está enfocada a la administración del riesgo que corresponde a los planes de mitigación, control, monitoreo y revisión de las áreas zonificadas. Cada una de las anteriores etapas requiere de un estudio particular debido a su amplia extensión y de acuerdo con las variables o tipo de riesgo que se esté gestionando.

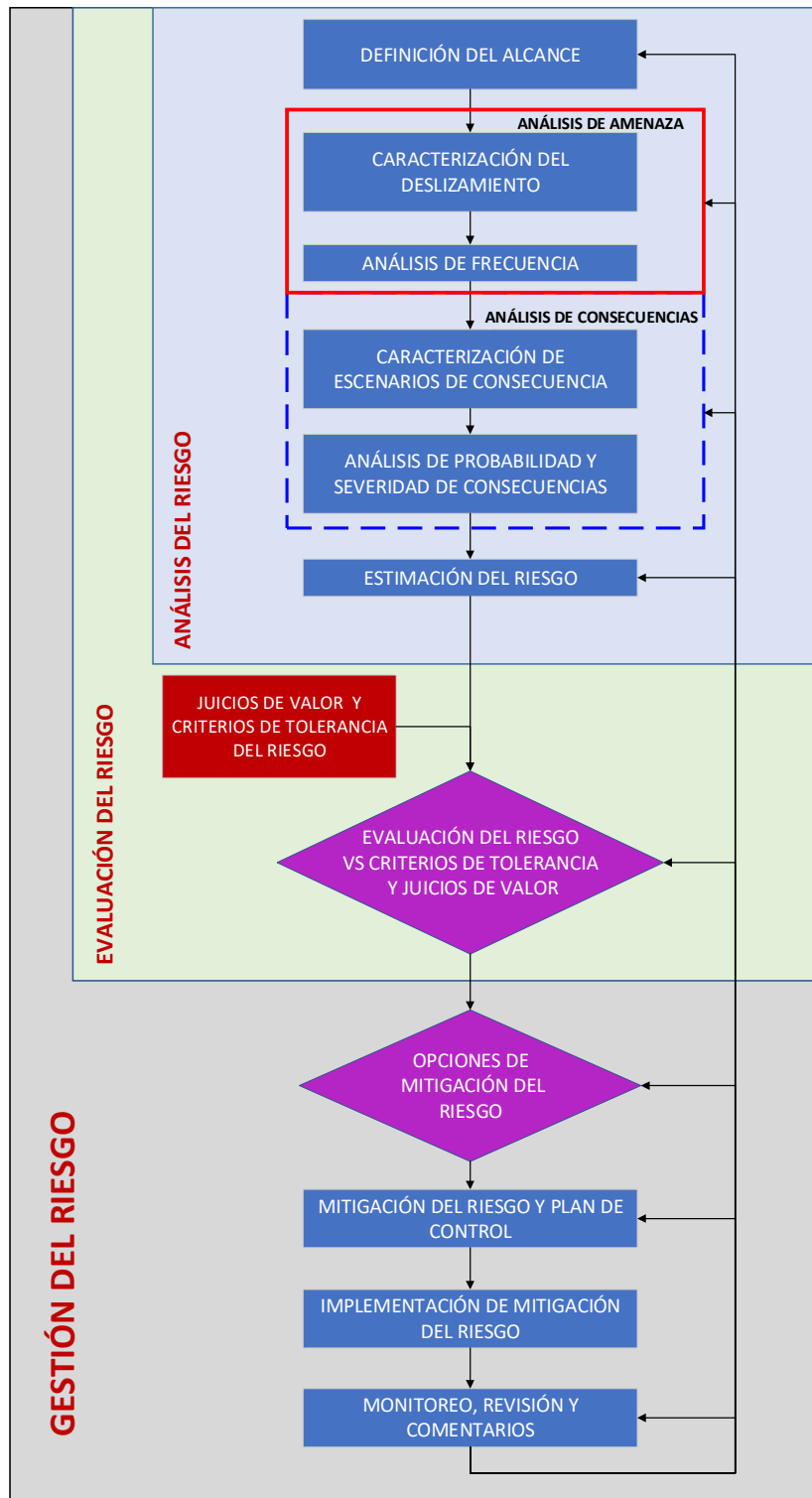


Figura 3-1. Ubicación temática del presente estudio en el marco de referencia para evaluación de riesgo por movimientos en masa.

Fuente: AGS, 2007a – Adaptación propia

3.2 Análisis de amenaza por procesos de remoción en masa a escala 1.25.000

Para un análisis de la amenaza se requiere de la caracterización y entendimiento de los procesos de remoción en masa, así como el análisis de frecuencia de su ocurrencia (AGS, 2007b). La definición de amenaza natural corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino, dentro de un periodo de tiempo y área específicos (Varnes, 1984).

Para la escala definida, la premisa en los análisis se fundamenta en el entendimiento de los procesos de remoción en masa pasados y presentes pues son la clave para entender los procesos futuros, pudiendo llegar a determinar zonas con un alto potencial de inestabilidad de acuerdo a las zonas ya inestables en un área determinada.

La división espacial de cuenca proporciona límites adecuados para los análisis de amenaza por movimientos en masa. La divisoria de aguas corresponde a un límite geomorfológico desde el cual se pueden presentar posibles fuentes de amenaza por deslizamiento. El límite inferior hasta el cual pueden viajar los materiales fallados es el drenaje principal de la cuenca. Los análisis de amenaza se realizan espacialmente de acuerdo a las características del terreno, cuyo resultado es una zonificación de amenaza.

3.2.1 Zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa

La zonificación de amenaza por deslizamientos ha sido un tema estudiado recientemente respecto a otras áreas de la ingeniería, aproximadamente en los últimos cincuenta años ha surgido la necesidad de realizar zonificaciones del terreno que permitan sustentar la toma de decisiones para la ocupación, uso y aprovechamiento adecuados. El término zonificación aplica en general el sentido de división de la superficie de la tierra en zonas clasificadas para este caso en grados amenaza por otros movimientos en masa (Varnes, 1984).

Para la zonificación de amenaza por movimientos en masa es ampliamente recomendado el uso de herramientas basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) (AGS, 2007b; Corominas et al., 2014; Robin Fell et al., 2008; Guzzetti et al., 2012; SGC, 2017). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son el conjunto de personas, equipos y software para la adquisición, almacenamiento, administración, análisis, manipulación y presentación de información geográfica.

Existen diferentes niveles de zonificación, la diferencia entre éstos radica en el detalle requerido y en consecuencia los costos de ejecución de los análisis. Se pueden definir cuatro tipos de propósitos finales para la zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa definidos en mapas como: mapas informativos, mapas de consulta, mapas regulatorios y mapas para diseño (AGS, 2007b), que a su vez se clasifican de acuerdo a una área específica como zonificación nacional, departamental, regional, semidetallada, detallada y para diseño (SGC, 2017).

En la Tabla 3-1, se presentan algunas descripciones respecto a la escala de los mapas de zonificación de amenaza y su aplicación en el ordenamiento del territorio propuestas por el Servicio Geológico Colombiano (2017). La escala 1:25.000 del presente trabajo se define como una escala medía y se encuentra en el límite entre la escala regional y semidetallada. Debido a que el área de trabajo corresponde a la división de subcuenca, este trabajo se enfoca a una escala semidetallada.

3.2.2 Determinación de la amenaza por proceso de remoción en masa

Para un sitio de estudio definido es necesario entender las particularidades del terreno y su predisposición para la ocurrencia de deslizamientos, por lo que definen las condiciones geo ambientales del sitio (SGC, 2017), siendo las condiciones propias del terreno que pueden llegar a variar con el tiempo y la variabilidad impuesta por el cambio climático.

Tabla 3-1. Relación entre de escalas, niveles de estudio y características de interés para zonificación de amenaza por movimientos en masa.

CARACTERÍSTICAS	NIVELES DE ESTUDIO					
	NACIONAL	DEPARTAMENTAL	REGIONAL	SEMI-DETALLADA	DETALLADA	DISEÑO
ESCALAS	< 1:500.000	> 1:250.000	> 1:100.000	> 1:25.000	> 1:10.000	
LÍMITES	y 1:250.000	y 1:100.000	y 1:25.000	y 1:10.000	y 1:1.000	>= 1:1.000
	PEQUEÑA		MEDIA		GRANDE	
UNIDAD GEOLOGICA	País	Departamentos	Cuencas hidrográficas, provincias y regiones	Subcuencas	Municipios	Sitios puntuales
EXTENSIÓN GEOGRÁFICA	> 1.000.000 km ²	25.000 km ²	1.500 km ²	300 km ²	15 km ²	< 1 km ²
OBJETIVOS	* Formulación de planes de desarrollo.		* Planes de ordenamiento territorial		Análisis de proyectos en etapas de factibilidad	
Alcances y Aplicaciones	* Política de prevención y atención de desastres * Información muy general para la toma de decisiones de grandes		* Planes de manejo de cuencas * Análisis de proyectos a nivel de prefactibilidad		* Ordenamiento territorial * Planeamiento urbano * Análisis de alternativas de proyectos viales * Localización procesos denudativos	
Nivel de investigación y/o de aplicación	- SGC - IDEAM - GOBERNACIONES - PROVINCIAS - ANLA - CAR's - INVIAS - REGIONES		- CAR's - Corporaciones Regionales de Desarrollo - Universidades e Instituciones de Investigación - INVIAS - ANLA - Firms Consultoras - Áreas Metropolitanas		- Áreas Metropolitanas - Municipios - Áreas Urbanas - Empresas Privadas - Firms Consultoras	

Fuente: (SGC, 2017)

Para caracterizar un área con fines de zonificación de amenaza por movimientos en masa es requerido identificar las zonas inestables y registrar sus características mediante el inventario de deslizamientos en el que se presentan algunos atributos como el tipo de movimiento, las posibles causas, la fecha de ocurrencia, los daños causados, entre otros (AGS, 2007b) (van Westen, Castellanos, & Kuriakose, 2008).

Con un inventario definido y con los factores condicionantes se estima la susceptibilidad del terreno a movimientos en masa. Posteriormente de acuerdo al mismo inventario con el factor detonante se define la amenaza.

▪ Clasificación de procesos de remoción en masa

La clasificación es importante debido a que a partir del inventario de deslizamientos en el que se registra los aspectos de clasificación se puede llegar a encontrar una tendencia a un tipo de deslizamiento o a un material particular, brindando una idea del comportamiento mecánico del terreno, permitiendo proyectar posibles mecanismos de falla predominantes y sus posibles soluciones.

En la literatura existen varios sistemas de clasificación de movimientos en masa que dependen en gran medida de los entornos donde se propusieron y practicaron, además de las características observables para la clasificación (tipo de material, contenido de agua, geomorfología, geología, entre otros).

En el presente trabajo se utiliza el sistema de clasificación propuesto en el *Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas* del año 2007 (PMA:GCA, 2007), el cual se realizó como un esfuerzo conjunto de los servicios geológicos de los países andinos y el Servicio Geológico de Canadá, por pretender unificar la clasificación de movimientos en masa para la zona andina. Dicho sistema es producto de la integración de varios sistemas de clasificación ampliamente utilizados y aceptados en la literatura técnica como: (Varnes, 1978), (Hutchinson, 1989), (Cruden & Varnes, 1996), (Hungr, Evans, & Hutchinson, 2001). El Servicio Geológico Colombiano (SGC & UNAL, 2016) propone algunas modificaciones al sistema de clasificación PMA:GCA, 2007, principalmente en lo referente al formato de levantamiento de información en campo.

Respecto a los otros sistemas propuestos, se puede decir que el sistema de clasificación de Varnes (1978) fue el más adoptado hasta 1996. En este sistema se define por primera vez el tipo de movimiento complejo, que hace referencia a la combinación de diferentes tipos de movimiento en un solo evento. Hutchinson (1989), plantea un sistema de clasificación basado fundamentalmente en aspectos de la geomorfología de los movimientos de masas y el relieve.

El sistema de clasificación de Cruden & Varnes, (1996) surge como resultado de una sesión de trabajo técnico realizada por la UNESCO en la década de los años noventa, buscando una clasificación unificada, adecuada y mundialmente válida para los

movimientos en masa. La principal característica de este sistema es la clasificación de los movimientos de acuerdo a su Actividad, que a su vez se divide en el estado de la actividad (activo, reactivado, suspendido, inactivo), la distribución (avanzado, regresivo, ensanchamiento, confinado, decreciente, en movimiento) y el estilo de la actividad (complejo, compuesto, múltiple, sucesivo, en solitario), haciendo mucho más detallada la clasificación de los movimientos. En la Tabla 3-2 se presenta una comparación entre algunos sistemas de clasificación de deslizamientos propuestos por diversos autores. En la tabla se puede observar el año en que se propuso cada sistema de clasificación y algunas características para la clasificación.

Tabla 3-2. Comparación de algunos sistemas de clasificación de deslizamientos.

Autor	Año	Tipo material	Tamaño material	Velocidad movimiento	Morfología	Actividad	Humedad
Sharpe	1938		X	X			X
García Yague	1966	X		X			X
Nemcok et al.	1972	X		X			
Crozier	1973				X		
Varnes	1978	X	X	X	X		X
Hutchinson	1988	X	X	X	X		X
Cruden & Varnes	1996	X	X	X	X	X	X
Dikay et al.	1996	X	X	X	X		X
García L. et al.	1998	X	X				
PMA	2007	X	X	X	X	X	X

Fuente: Curso de Estabilidad de Taludes UNAL – Adaptación propia.

También se han realizado trabajos de clasificación de acuerdo a trabajos y zonas particulares, por ejemplo, en el Proyecto Gestión del Riesgo Manizales (2015), se presentó una propuesta de clasificación teniendo como base el sistema de clasificación del PMA:GCA (2007), pero con algunas variaciones en la forma y contenido del registro, propios de la zona de estudio.

Algo adicional en este sistema es que sugiere una clasificación espacio-temporal de la calidad de la información de movimientos en masa obtenidos a partir de información secundaria, teniendo en cuenta la incertidumbre en la fecha y localización. En la Tabla 3-3 se presenta la propuesta de clasificación de la precisión espacio-temporal de un proceso

de remoción en masa, en la que se le da un peso cada registro del inventario, de acuerdo al grado de precisión espacio-temporal. Siendo los mayores pesos los registros más precisos.

Tabla 3-3. Clasificación de la precisión espacio-temporal de los registros de movimientos en masa.

Clasificación de la precisión espacial y temporal para el inventario de movimientos en masa			UBICACIÓN ESPACIAL			
			Precisa	Aproximada	Estimada	Incierta
			coordenadas	direcciones	sitios	sin localización
UBICACIÓN TEMPORAL	Precisa	fecha y hora conocida	16	14	11	6
	Aproximada	fecha reportada	15	13	9	4
	Estimada	fecha inferida	12	10	8	2
	Incierta	sin fecha o con año	7	5	3	1

Fuente: Oscar Correa Calle – Gestión del Riesgo para Manizales.

Teniendo en cuenta las descripciones anteriores y definiendo en el presente trabajo el uso del sistema de clasificación del PMA:GCA (2007), se presentan los tipos de procesos de remoción en masa con que se propone realizar el inventario (Ver Tabla 3-4).

Tabla 3-4. Tipos de movimientos en masa para el análisis de amenaza.

TIPO	SUBTIPO
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)

TIPO	SUBTIPO
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelo Solifluxión, gelifluxión (en Permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

Fuente: (PMA:GCA, 2007).

▪ Causas de los movimientos en masa

Con el fin de entender las causas de la ocurrencia de los procesos de remoción en masa se han realizado diversos estudios detallados que brindan la idea de los factores detonantes de inestabilidad (Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2001; Hutchinson, 1989; Varnes, 1978). Entre las causas más frecuentes se pueden encontrar factores propios de las condiciones de los materiales del sitio como la disposición favorable de los estratos, la composición química y la estructura del material entre muchos otros. Por otra parte, los factores detonantes de inestabilidad son aquellos que dan origen al movimiento, generalmente corresponden a eventos naturales excepcionales como la precipitación y los sismos.

Pueden existir múltiples combinaciones entre los factores condicionantes y detonantes que dan resultado la inestabilidad de un sitio específico, sin embargo, es complejo determinar la relación entre los factores y definir las combinaciones que ocasionan un movimiento en masa. En la Tabla 3-5, se presenta un listado de factores que pueden llegar a causar un proceso de inestabilidad, en el que se identifican condiciones geológicas y geomorfológicas, además de factores físicos y antrópicos que detonan la inestabilidad.

Tabla 3-5. Listado de factores causantes de procesos de remoción en masa.

1- CONDICIONES GEOLÓGICAS
Materiales plásticos débiles Materiales sensitivos Materiales colapsables Materiales meteorizados Materiales cizallados Materiales fisurados o diaclasados Discontinuidades en macizo o masa de suelo orientadas en la misma dirección de la ladera Discontinuidades estructurales Contraste en permeabilidad y de rigidez
2- CONDICIONES GEOMORFOLÓGICAS
Levantamiento tectónico Levantamiento volcánico Rebote glacial Erosión fluvial de la base del talud Erosión costera de laderas Erosión glacial de laderas Erosión de márgenes laterales Erosión subterránea Depósitos de material transportado en la base o cresta de la ladera Remoción de vegetación
3- PROCESOS FÍSICOS
Periodos de lluvia intensos Derretimiento súbito de hielo Precipitación prolongada Descenso de niveles de inundación o mareas altas Sismos Erupciones volcánicas Rompimiento de reservorios Contracción y expansión de suelos expansivos
4- PROCESOS ANTRÓPICOS
Excavación de laderas Imposición de cargas en el borde de laderas Desocupar reservorios Irrigación de laderas Sistemas de drenaje defectuosos Deforestación Minería Rellenos no técnicos Vibración artificial

(Cruden & Varnes, 1996; SGC, 2017)

De acuerdo a los múltiples factores condicionantes y detonantes descritos en la tabla, es difícil cuantificar la relación o el grado de correspondencia en la ocurrencia de eventos de inestabilidad de cada uno de los factores, sin embargo, de alguna manera se han elaborado aproximaciones para la zonificación de amenaza definiendo los factores más relevantes en cada caso de estudio (Guzzetti et al., 2012; SGC, 2017; Van Westen, 1993), a partir del análisis del inventario de movimientos en masa.

3.2.3 Inventario de procesos de remoción en masa

El inventario es el que permite identificar las zonas inestables ocurridas con anterioridad, permitiendo estudiar e interpretar las causas de los procesos de inestabilidad y las condiciones propias del terreno (SGC, 2017). Con el inventario y los factores condicionantes definidos se desarrolla alguno de los modelos de susceptibilidad que pueden ser de tipo heurístico, estadístico, probabilístico, geomorfológico, entre otros. No existe un mejor o peor modelo de susceptibilidad, pues un desarrollo matemático complejo no garantiza un mejor resultado, ni tampoco lo garantizan los modelos más sencillos. Lo importante es identificar los factores adecuados y modelarlos de una forma lógica, siendo éste el trabajo del geotecnista o analista de riesgos.

El contenido del inventario es un listado de registros de procesos de remoción en masa. Los registros se componen de las variables descritas en los sistemas de clasificación de deslizamientos (Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2001; Hutchinson, 1989; PMA:GCA, 2007; SGC & UNAL, 2016), junto con características propias de la ubicación espacial y temporal de movimientos en masa individuales y su entorno (AGS, 2007b; Robin Fell et al., 2008; Guzzetti et al., 2012; Malamud, Turcotte, Guzzetti, & Reichenbach, 2004). Una propuesta de las actividades requeridas para preparar un inventario de deslizamientos se presenta en la Tabla 3-6, a continuación.

Tabla 3-6. Actividades requeridas para la preparación de inventarios de deslizamientos.

MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN	ACTIVIDADES
Básico	Preparar un inventario de deslizamientos en el área a partir de fotografías aéreas y/o imágenes satelitales, mediante el mapeo y el registro histórico. El inventario incluye la ubicación, clasificación, volumen (o área) y en la medida de lo posible, la fecha de ocurrencia del deslizamiento.
	Identificar la relación con la topografía, geología y geomorfología.
	Mostrar esta información en los mapas de inventario sobre la información topográfica, incluyendo los contornos, los límites de las propiedades, la cuadrícula de mapeo, las carreteras y otros elementos importantes, como las corrientes y cursos de agua.
Intermedio	Las mismas actividades que el método básico más
	Distinguir las diferentes partes de los deslizamientos.
	Mapear de características y límites de los deslizamientos.
	Recopilar y evaluar información histórica sobre la actividad del deslizamiento.
	Analizar la evolución pasada del uso del terreno para saber si las actividades humanas han influido en la incidencia de deslizamientos.
	Aumentar el tiempo y recursos en la fase de investigación de compilación del inventario que resulta en una cobertura más rigurosa y extensa.
Sofisticado	Las mismas actividades que el método intermedio más
	Preparar un inventario de datos geotécnicos.
	Implementar investigaciones para mejorar la definición de las condiciones geotécnicas.
	Realizar análisis geotécnicos para comprender los procesos de inestabilidad en la ladera.
	Catalogar temporal y de forma avanzada las reactivaciones periódicas de una misma amenaza y la visualización temporal de eventos desencadenantes específicos para proporcionar conjuntos de datos periódicos los cuales pueden ser usados en aproximaciones avanzadas de la validación.

Fuente: (AGS, 2007c)

De acuerdo a la calidad en la información con que se cuente y que se pueda levantar, se definen diferentes tipos de conjuntos de registros de movimientos en masa (SGC, 2017), como se presenta a continuación:

- **Catálogo de deslizamientos:** es una base de datos de registros históricos de procesos de remoción en masa, reportados por entidades de rescate y atención a la comunidad y medios de comunicación en general. Solamente se presenta el reporte de las afectaciones, no se presentan clasificaciones de los procesos.
- **Inventario de deslizamientos a partir de información secundaria:** como su nombre lo indica es obtenido a través de información secundaria como de literatura

especializada, reportes técnicos, estudios y diseños de obras de estabilidad, bases de datos, entre otros documentos que presentan una definición espacial y temporal aproximada de los movimientos.

- **Inventario de deslizamientos geomorfológico:** se basa en evidencias físicas de la ocurrencia de procesos de remoción en masa, mediante la identificación en imágenes satelitales y fotografías aéreas con su respectiva validación y levantamiento en el terreno.

Se debe resaltar la importancia de cada uno de los tipos de registro de deslizamientos, los cuales se diferencian principalmente en los aspectos históricos y en la calidad y cantidad de información levantada útil para la modelación de la amenaza.

El catálogo de deslizamientos contiene importante información histórica de los procesos que afectaron a la población, sin embargo, cuentan con poca certeza técnica debido a la falta de precisión espacial y temporal. Generalmente el catálogo describe movimiento en masa materializados en riesgos, es decir que han causado alguna pérdida económica.

El inventario a partir de información secundaria corresponde a la compilación de información documentada de movimientos en masa que generalmente también afectaron de alguna manera a la comunidad. Son obtenidos de bancos de datos del tema, estudios y diseños para la mitigación de la inestabilidad, literatura técnica y de estudios de amenaza o inventarios previos definidos para proyectos particulares.

Como fuentes de información para Colombia se han realizado múltiples esfuerzos en el tema encabezados por el Servicio Geológico Colombiano con el desarrollo del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) el cual cuenta con importante información para la construcción de un inventario final. En el inventario de deslizamientos del SIMMA se clasifican los procesos como históricos, de eventos y multitemporales, pero también se presenta un catálogo de deslizamientos.

DESINVENTAR corresponde es una plataforma para el reporte, almacenamiento y seguimiento de desastres para américa latina que cuenta con información de deslizamientos en algunos departamentos de Colombia.

También se encuentran inventarios de deslizamientos de entidades públicas encargadas de la gestión del territorio como las corporaciones autónomas regionales, las secretarías de planeación del territorio, la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo (UNGRD) y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), las cuales cuentan con alguna información, sin embargo, ésta no es disponible al público, sin previos requerimientos y solicitudes ante dichas entidades.

Otra fuente de información importante, puede corresponder a las empresas de consultoría y construcción dedicadas a la estabilidad de laderas y análisis de amenaza, las cuales pueden llegar a ser una fuente de información considerable.

El inventario de procesos de remoción en masa a partir de la identificación de rasgos geomorfológicos, corresponde al tipo de inventario más completo, pues es el que más describe información valiosa para la zonificación de amenaza. En este tipo de inventario se registra la ocurrencia de los deslizamientos a partir de la interpretación de información obtenida de imágenes satelitales y fotografías aéreas verificadas en el terreno. En la Figura 3-2 se presenta un ejemplo de mapa de un inventario geomorfológico en el que se puede observar la magnitud de los procesos y los materiales involucrados.

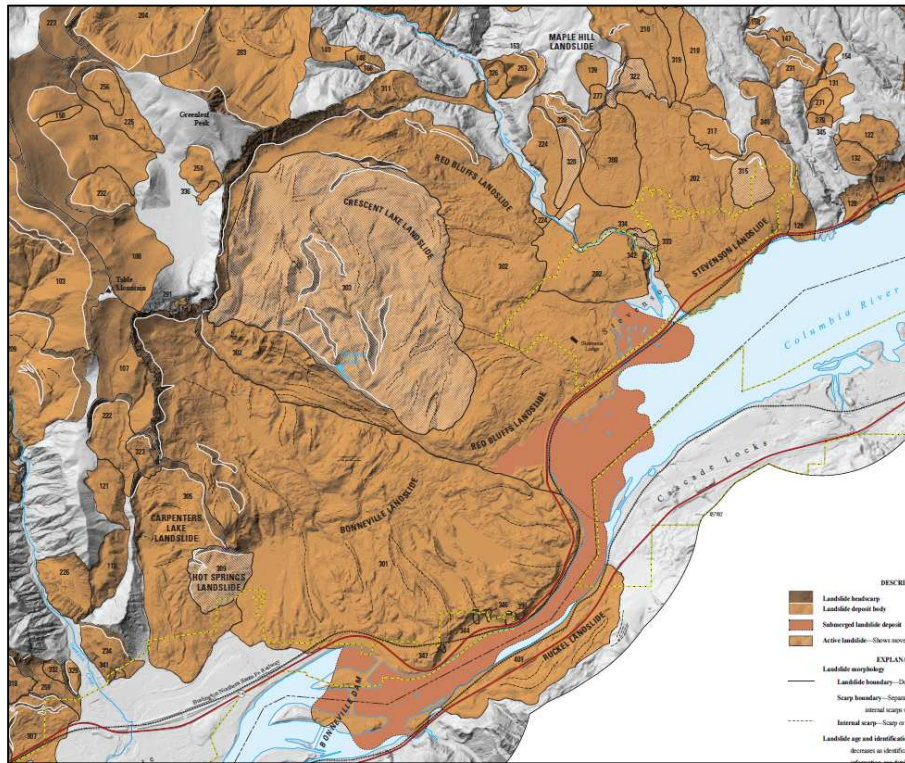


Figura 3-2. Mapa de procesos de remoción en masa de una zona en Estados Unidos.

(Pierson, Evarts, & Bard, 2016)

▪ Contenido del inventario de deslizamientos

El contenido del inventario corresponde a los elementos mínimos requeridos con que debe contar un registro de procesos de remoción en masa. Según el Servicio Geológico Colombiano (2017), se requiere identificar las fuentes de información, realizar la representación como polígono y el mapeo que a su vez contiene el tipo, actividad, partes del movimiento y rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad y atributos asociados de la base de datos (SGC, 2017). Un listado de atributos para el inventario de deslizamientos sugerido se presenta en la Tabla 3-7, a continuación.

Tabla 3-7. Propuesta para los campos que conforman un registro del inventario de movimientos en masa.

No.	CAMPO	DESCRIPCIÓN
1	ENCUEST	Nombre(s) de la persona(s) que recopila(n) los datos bien sean en campo, oficina o en ambos.
2	ID_MOV	Corresponde al identificador principal del movimiento en masa levantado en campo o en la fotointerpretación. Se sugiere que sean dos letras (las iniciales del encuestador) seguidas de tres dígitos numéricos.
3	COD_SIMMA	Este campo solo será diligenciado si la información del movimiento en masa fue cargada al SIMMA. Corresponde al código asignado por dicho aplicativo al movimiento en masa inventariado.
4	FECHA_REP	Corresponde a la fecha en que se inventarió el movimiento en masa. No se debe confundir con la fecha de ocurrencia del movimiento en masa.
5	FECHA_MOV	Fecha de ocurrencia del movimiento en masa. Si no se tiene conocimiento de la fecha de ocurrencia del movimiento en masa, entonces se asignará la fecha de la imagen de sensor remoto más antigua en la cual fue identificado el movimiento. En cualquier otro caso, asignar la misma fecha de reporte.
6	FTE_INFSEC	Nombre de las imágenes interpretadas o de los estudios a partir de los cuales se levantó el movimiento en masa. Es necesario indicar la fecha de la fuente respectiva. Nota: En algunos estudios técnicos, puede obtenerse directamente la fecha del movimiento en masa. Para algunos estudios técnicos cuyo título sea muy extenso, escribir sólo la cita bibliográfica (autor y año) e incluirla en las referencias del informe escrito.
7	DPTO	Departamento donde se localiza el movimiento.
8	PLANCHA	Número de la plancha escala 1:25.000.
9	MUNICIPIO	Municipio donde se localiza el movimiento.
10	REF_GEOGRF	Debe indicar algún accidente geográfico cercano o del mismo lugar de ocurrencia del movimiento en masa, que permita establecer su localización.
11	VEREDA	Vereda en la que se localiza el movimiento.
12	PARTE	Corresponde a la parte del movimiento identificada. Para el escarpe principal o zona de inicio se utiliza la letra (e) y para la zona de depósito o cuerpo del movimiento la letra (d). En el caso en que no se pueda identificar
13	ID_PARTE	Corresponde al identificador del polígono de cada una de las partes que conforman el movimiento en masa (escarpe y cuerpo). Se propone numerarlas en forma consecutiva. Ejemplo: el movimiento con ID_MOV JC001 en el cual se han identificado dos escarpes y un cuerpo, está conformado por tres polígonos identificados como JC001-1, JC001-2 y JC001-3.
14	ETIQUETA	Letras que indican el tipo y subtipo de movimiento en masa de acuerdo con la Tabla 3.6. Este puede ser acompañado de una letra que identifique la parte del movimiento en masa.

No.	CAMPO	DESCRIPCIÓN
15	ESTE_ESC	Coordenada Este (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono correspondiente al escarpe del movimiento en masa (no aplica para avenidas torrenciales y reptación).
16	NORTE_ESC	Coordenada Norte (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono correspondiente al escarpe del movimiento en masa (no aplica para avenidas torrenciales y reptación).
17	ESTE_CUERP	Coordenada Este (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono que corresponde al cuerpo del movimiento (zona de depósito).
18	NORT_CUERP	Coordenada Norte (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono que corresponde al cuerpo del movimiento (zona de depósito).
19	ESTE	Coordenada Este del centroide del movimiento (Magna Sirgas origen Bogotá). Este campo se diligencia en el caso que no sea posible diferenciar las partes de un movimiento en masa.
20	NORTE	Coordenada Norte del centroide del movimiento (Magna Sirgas origen Bogotá). Este campo se diligencia en el caso que no sea posible diferenciar las partes de un movimiento en masa.
21	ALTITUD	Valor de altitud del movimiento en metros sobre el nivel del mar (msnm).
22	TIPO_MOV1	Tipo del primer movimiento en masa (caída, volcamiento, deslizamiento translacional y rotacional, propagación lateral, reptación, flujo, deformaciones gravitacionales y sin clasificar).
23	TIPO_MOV2	Esta casilla se diligencia en el caso en que se identifique más de un tipo de mecanismo en el mismo movimiento.
24	SUBTIPO_1	Subtipo de movimiento en masa de acuerdo al PMA: GCA, 2007.
25	SUBTIPO_2	Esta casilla se diligencia en el caso en que se identifique más de un subtipo de mecanismo en el mismo movimiento.
26	ACTIVIDAD	Define si el movimiento se encuentra activo o inactivo.
27	AREA_MOV	Área del movimiento en masa en m ² . En el caso de movimientos tipo caída, se registra el área del cuerpo (zona de depósito), para los demás tipos de movimientos se registra el área total del polígono (escarpe + cuerpo).
28	ELEM_EXP	Identificar el tipo de elemento afectado por la ocurrencia del movimiento en masa, empleando los términos definidos en el ítem “tipo de daños” del formato de inventario.

Fuente: (SGC, 2017)

De acuerdo a la tabla anterior se requieren de 28 campos para la elaboración de un registro válido en el inventario de deslizamientos, se debe tener en cuenta que en algunos casos se encuentran movimientos de un solo tipo, por lo que no se requieren de todos los campos presentados en la tabla.

- **Representación cartográfica de movimientos en masa**

La representación cartográfica hace referencia a la homogenización de las convenciones y la identificación de las partes del deslizamiento mínimas requeridas para realizar una adecuada representación y almacenamiento de cada uno de los registros que conforman el inventario de deslizamientos. También como representación cartográfica se define el contenido de las etiquetas que se deben presentar en un mapa de inventario de deslizamientos, siendo producto del mismo trabajo de clasificación de deslizamientos.

Las convenciones cartográficas son necesarias para la adecuada identificación y presentación de un mapa de inventario de procesos de remoción en masa. En la Tabla 3-8 se presenta la representación cartográfica y simbología de algunos atributos para los diferentes tipos de movimientos en masa (SGC, 2017).

- **Interpretación de imágenes y observación de la tierra**

Cada vez es mayor el uso de imágenes satelitales para diferentes análisis del terreno en diversas áreas del conocimiento. Principalmente debido a la facilidad de contar con imágenes de mejor calidad y con una distribución temporal adecuada. Las herramientas de SIG y de teledetección espacial han permitido la integración de las imágenes satelitales como fuente primaria de información para la realización de análisis geoespaciales.

Para realizar una adecuada identificación e interpretación de imágenes, se requiere práctica en el tema y lógica de acuerdo a lo que el intérprete conozca del terreno, así pues, el observador sabrá identificar zonas y coberturas, como por ejemplo vegetación de alto porte, característica por su color verde y su textura rugosa.

Tabla 3-8. Simbología sugerida para la cartografía temática del inventario de deslizamiento.

TIPO	SUBTIPO	PROFUNDIDAD	ACRÓNIMO	IDENTIFICADOR PARTES DEL MOVIMIENTO		ACTIVIDAD	
				ESCARPE (Zona de inicio)	CUERPO (Zona de depósito)	ACTIVO	INACTIVO
Deslizamiento	Rotacional		drs/drp	drs-e/ drp-e	drs-d/ drp-d		
	Traslacional	Superficial/ Profundo	dts/dtp	dts-e/ dtp-e	dts-d/ dtp-d		
Caídas	Roca	NA	cr	cr-e	cr-d		
	Suelo	NA	cs	cs-e	cs-d		
Volcamiento	Bloque	NA	vb	vb-e	vb-d		
	Flexural	NA	vf	vf-e	vf-d		
	Flexural macizo rocoso	NA	vfm	vfm-e	vfm-d		
Flujos	Avenidas Torrenciales	NA	av	NA	av		
	Flujo de lodo	NA	fl	fl-e	fl-d		
	Flujo de tierra	NA	ft	ft-e	ft-d		
	Flujo de detritos	NA	fd	fd-e	fd-d		
	Deslizamiento por flujo	NA	df	df-e	df-d		
Reptación	NA	Superficial/ Profunda	rs/rp	NA	rs/rp		

Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000 (SGC, 2017). Adaptación propia.

Existen metodologías que permiten llevar a cabo de buena manera y en orden la interpretación de imágenes de satélite. El Observatorio de la Tierra de la NASA (“NASA Earth Observatory”, 2018), propone cinco claves o estrategias para la interpretación de imágenes las cuales se listan a continuación:

- Observar la escala: hace referencia de identificar los lugares y áreas familiares en extensión, como vías, casas, parques, cultivos, entre otros, los cuales brindarán un estimado de las proporciones del análisis y escala a realizar.
- Buscar en la imagen patrones, formas y texturas, que permiten inferir estados del material y su formación.
- Definir colores incluyendo sombras: depende de la calidad de la imagen a interpretar y define zonas de cambio de uso o denudación del terreno.
- Referenciar siempre el Norte: hace referencia a interpretación básica de siempre conservar la referencia espacial para definir procesos en términos de su dirección.
- Considerar su conocimiento previo del área de estudio o similares: Es el que brinda la finalidad de la interpretación o el objetivo de la misma, pues se requiere conocer adecuadamente lo que se desea encontrar o interpretar en las imágenes.

La interpretación de imágenes es un proceso individual producto de la experiencia, capacitación y habilidades del observador. Otros autores han propuesto metodologías y recomendaciones para la interpretación de imágenes con fines geomorfológicos (Zuidam, 1986), como se presenta a continuación:

- La interpretación debe ir de lo general a lo particular. Las unidades geológicas o geomorfológicas deben interpretarse antes que los detalles.
- La interpretación debe hacerse de los rasgos conocidos o familiares a los desconocidos, raros o anómalos.

- Las fotografías deben interpretarse únicamente en función de lo que ellas contengan.
- En análisis multitemporales se recomienda estudiar de la imagen más reciente a la más antigua.

En el país existen varias entidades públicas que utilizan información de imágenes satelitales, siendo el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) la entidad que rige el tema. El IGAC brinda una serie importante en el tiempo de fotografías aéreas y últimamente de imágenes satelitales para el territorio nacional, siendo una buena fuente de información.

4. Propuesta metodológica para la elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa a escala 1:25.000 en cuencas

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para la elaboración de los mapas de amenaza por procesos de remoción en masa a la escala definida para cuencas hidrográficas. Inicialmente se describen las definiciones y consideraciones para de escala de trabajo y la unidad mínima cartografiable, luego se presenta la cartografía base mínima requerida para los análisis. Posteriormente se ahonda en la propuesta metodológica para el levantamiento del inventario de procesos de remoción en masa. Se definen las variables para los análisis de susceptibilidad y se describen las propuestas para el análisis del factor detonante lluvia, mediante un método estadístico. Finalmente se describe la caracterización de la amenaza usando como validación el mapa de densidad de deslizamientos (isopleths).

La propuesta metodológica se basa en que las características de la amenaza por procesos de remoción en masa pasadas y presentes son la clave para determinar las posibles características futuras (Carrara & Guzzetti, 1995). Lo anterior tiene lógica y es válido para condiciones ambientales aproximadamente constantes, que son cada vez menos predecibles por el cambio climático que afecta al globo terrestre.

En la Figura 4-1 se presenta el marco general de la metodología para la generación de mapas de amenaza propuesta. Se debe tener en cuenta que existe alguna similitud a la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano de 2017, debido principalmente a un tema cronológico entre la presentación de la propuesta de la presente tesis realizada en el segundo semestre de 2015 y el trabajo descrito. Los autores vieron la necesidad de articular de alguna manera los dos documentos con el ánimo de avanzar en el conocimiento generado en paralelo por muchos profesionales y expertos para las condiciones del país resumidos en el documento del SGC.

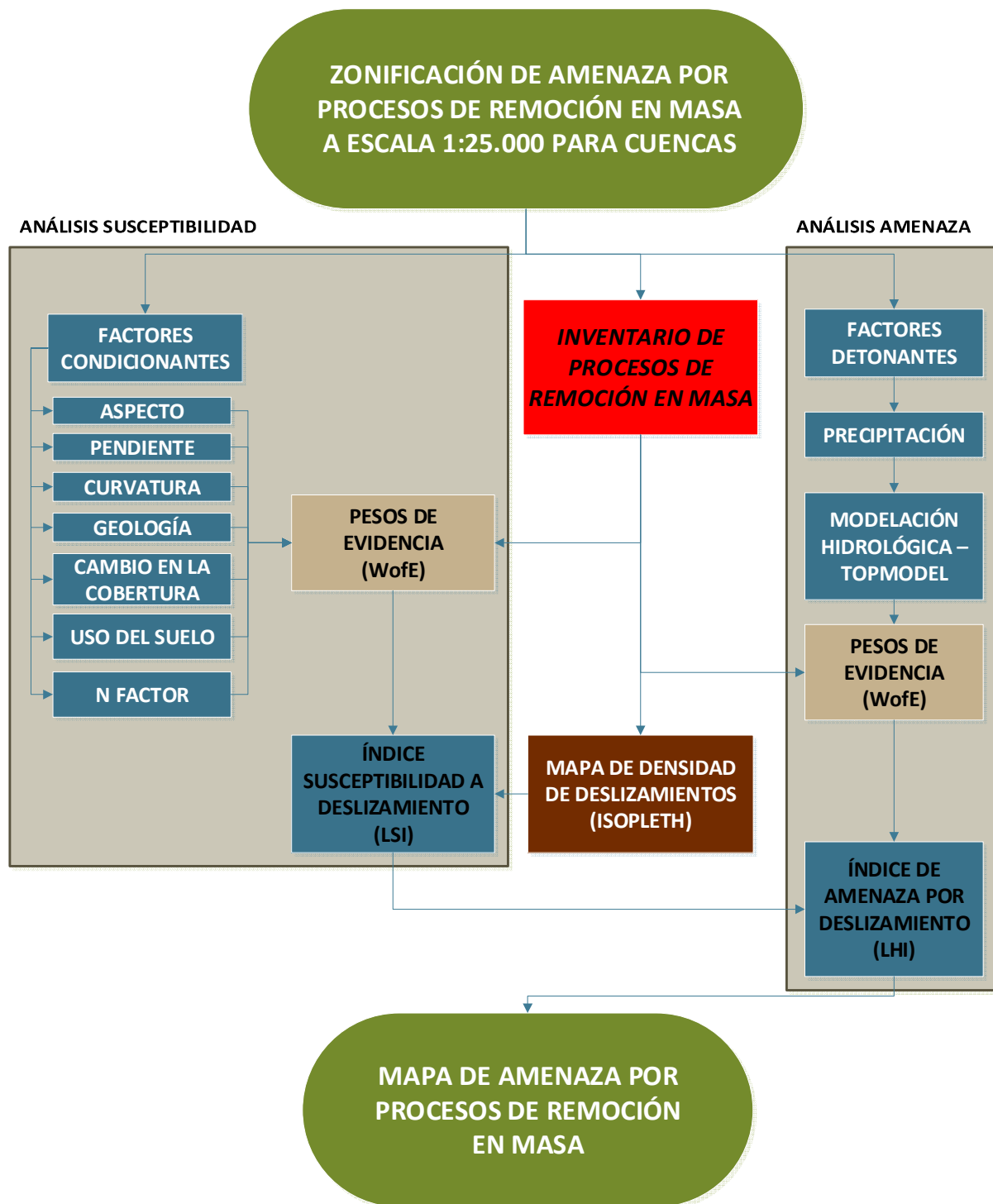


Figura 4-1. Diagrama de flujo de la propuesta metodológica para la elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa.

Del diagrama se puede observar como el inventario de procesos de remoción en masa es fundamental en este tipo de análisis de amenaza, pues es la variable que define las condiciones de inestabilidad y su relación con cada uno de los demás factores (condicionantes y detonante). Debido a esto en la propuesta metodológica se ahonda en el tema del levantamiento del inventario, buscando brindar solución a la falta de información de ese tipo. En los siguientes subcapítulos se describen cada uno de los procesos presentados en el diagrama de flujo de la metodología propuesta.

4.1 Escalas de trabajo, unidad mínima cartografiable y unidad de análisis

Respecto a la escala es necesario hacer la diferenciación entre: la escala de presentación de los mapas productos y la escala de levantamiento de información en campo. Las dos anteriores conforman las escalas de trabajo, sin embargo, la más importante es la escala de levantamiento de información pues es la que garantiza la representación adecuada de la realidad a una escala determinada. De acuerdo a la escala de levantamiento se define la unidad mínima cartografiable (UMC), la cual corresponde a la resolución o distancia mínima con la que se debería levantar la información en campo.

La impresión de mapas puede hacerse a diversas escalas de acuerdo con el tamaño de papel y con el detalle con que se requiera representar algún tema o atributo específico. Puede existir alguna de las siguientes condiciones que describen las posibilidades de presentación de un mapa de acuerdo con la escala de levantamiento de información y la escala de impresión o ploteo. Las condiciones descritas a continuación se refieren a una escala intermedia 1:25.000:

- *Presentación de un mapa en una escala grande de información levantada a una escala intermedia:* Es posible que se requieran múltiples planos para abarcar la zona de estudio levantada a una escala intermedia. Aunque la escala de impresión sea detallada, no se observarán detalles de la realidad en la impresión, debido a que la información ha sido levantada en una escala de menor resolución.

- *Presentación de un mapa en escala intermedia, de información levantada a una escala intermedia:* Es la situación ideal para la presentación, pues corresponde a la definición de escala como la relación entre las dimensiones en el papel sobre las dimensiones en el terreno.
- *Presentación de un mapa en una escala pequeña, de información levantada a una escala intermedia:* Corresponde a mapas regionales, en los que la información intermedia levantada, ocupará solamente una pequeña área de toda el área de impresión disponible.

En la generación de mapas se deben considerar las características de los equipos de impresión, de las tintas y de los papeles, que se usarán, permitiendo detallar con precisión la calidad de los mapas finales. La calidad de impresión se puede configurar de acuerdo con la cantidad de puntos impresos por pulgada (dpi) que corresponde a la cantidad de puntos que conforman una línea de una pulgada de longitud. Calidades normales de impresión pueden tener entre 300 y 400 dpi, es decir 11.8 y 15.7 puntos por mm, mientras que calidades altas de impresión pueden tener hasta 600 dpi.

De manera estricta la entidad geométrica de punto no corresponde a un espacio determinado, sin embargo, se ha representado el punto como una figura geométrica pequeña que describe la ubicación de objetos o límites que generalmente tienen dimensiones del orden milímetros en la impresión análoga. Una imagen a su vez está compuesta por elementos de igual color y tamaño denominados píxeles.

Uno de los modelos para representar la realidad en los SIG corresponde al modelo raster el cual es conformado por píxeles de manera similar a una imagen, es decir es una representación espacial continua de la realidad, de acuerdo a esto es necesario definir el tamaño del píxel de acuerdo a la escala de trabajo, que correspondería a la misma unidad mínima cartografiable (UMC). Del tamaño que se defina como punto dependerá la representación de la realidad como se muestra en la Tabla 4-1, a continuación.

Tabla 4-1. Capacidad de representación del terreno de un punto de diferente tamaño a diferentes escalas.

TAMAÑO DE PUNTO (mm)	TAMAÑO DE REPRESENTACIÓN DEL TERRENO DE ACUERDO A ESCALA (m)					
	Escala 1:					
	200	1,000	5,000	10,000	25,000	100,000
0.5	0.1	0.5	2.5	5.0	12.5	50.0
1.0	0.2	1.0	5.0	10.0	25.0	100.0
1.5	0.3	1.5	7.5	15.0	37.5	150.0
2.0	0.4	2.0	10.0	20.0	50.0	200.0

Elaboración propia

Según lo sugerido por el SGC (2017) se recomienda una unidad mínima cartografiable (UMC) de 4x4 mm, definiendo un área de 10.000 m², por lo que definen un tamaño mínimo de punto de 1 mm que a la escala de trabajo corresponde a 25 m en el terreno.

Para el presente trabajo se propone acogerse a lo definido por el SGC (2017) respecto al levantamiento de información de los mapas temáticos como: la geología, la geomorfología, el uso del suelo y la cobertura del terreno, es decir con una unidad mínima cartografiable (UMC). Para las variables de morfometría que son obtenidas a partir del DEM se propone utilizar como UMC el valor de tamaño de 2 píxeles del DEM, de acuerdo a las reclasificaciones radiales que se presentan posteriormente en el documento. La escala para el levantamiento del inventario de deslizamientos no se restringe debido a la necesidad de contar la mayor cantidad de eventos de inestabilidad posibles.

Aunque la unidad de pixel físicamente en el terreno no representa sino un cuadrado de una distancia de lado determinada, puede llegar a representar poco a la hora de analizar la estabilidad de una zona en particular. Debido a esto en el presente trabajo se propone realizar una reclasificación de los mapas obtenidos de acuerdo a herramientas de estadísticas focales para las variables de morfometría. La clasificación permitirá una regionalización de pixeles que permiten definir zonas de ladera homogénea eliminando la mayoría de pixeles individuales.

En síntesis, el análisis de estadísticas focalizadas consiste en realizar un análisis estadístico de los píxeles vecinos al pixel de análisis, la forma geométrica para la selección y su extensión son las variables que se definen de acuerdo a la escala de trabajo. En la Figura 4-2 se presenta una descripción grafica de la herramienta de estadísticas focales de promedio, en donde se puede observar que los pixeles que se encontraban sin vecino del mismo valor, tomaron el valor del promedio de los nueve píxeles agrupados en una ventana de análisis de 3x3 píxeles.



Figura 4-2. Descripción de funcionamiento para la herramienta de análisis de vecindades en SIG.

Elaboración propia

Se propone que la reclasificación se realice tomando el valor mayor de los píxeles vecinos que se encuentre en un radio de 2 veces el tamaño del pixel del DEM. Obteniendo así formas que se pueden interpretar de mejor manera en el terreno.

Finalmente, la unidad de análisis propuesta hace referencia a un píxel individual, pues es la unidad mínima que representa información homogénea y que a su vez en conjunto con otros píxeles determina la extensión de un mapa. Un píxel se puede representar como un punto lo que permite la interacción y análisis entre mapas o capas de información que componen los factores condicionantes y detonantes.

4.2 Cartografía base

Para los análisis de terreno basados en procesos en software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se propone utilizar el Modelo de Elevación Digital (DEM) disponible del proyecto satelital ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite-1 - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), que corresponde a un DEM de resolución de 12.5 m x 12.5 m de tamaño de pixel. La escena de captura del sensor es de 50 km x 70 km. Aunque fue un proyecto ejecutado entre los años 2006 – 2011, se considera que cuenta con información de elevación adecuada para la escala de análisis 1:25.000. El sitio web para la adquisición de la información corresponde al Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de E.E.U.U (NASA).

Para los análisis de cobertura de la tierra se requiere de información de sensores remotos, que permiten obtener características de la superficie de acuerdo a la radiancia de los cuerpos. Se recomienda la utilización de los productos del proyecto satelital Sentinel-2, de la Agencia Espacial Europea (ESA), siendo de acceso gratuito y que cuentan con una resolución de 10 a 20 metros y múltiples bandas, adecuadas para la escala de análisis.

Como cartografía base para las capas temáticas como geología, geomorfología y uso del suelo se propone realizar una búsqueda exhaustiva de información secundaria temática a nivel nacional y local en entidades encargadas de cada tema, como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), las corporaciones autónomas regionales, las secretarías de planeación y universidades, entre otras. Idealmente se debería realizar el levantamiento de toda la información en campo, sin embargo, muchas veces no se cuentan con los recursos para llevar a cabo los trabajos, por lo que se propone trabajar con esta información secundaria, en caso de contar con los recursos económicos se recomienda validar cada capa temático en campo.

4.3 Metodología para el levantamiento del inventario de procesos de remoción en masa

A continuación, se presentan la propuesta metodológica para la identificación y caracterización de procesos de remoción en masa a partir de la interpretación multitemporal de imágenes satelitales de uso libre, para completar el levantamiento del inventario de movimientos en masa. A continuación, se presentan los pasos generales propuestos como metodología para el levantamiento.

- Definir el sistema de clasificación de movimientos en masa a utilizar en la identificación y caracterización de los procesos, para el presente trabajo se propone utilizar el propuesto por el PMA: GCA (2007).
- Proponer unidades de inspección visual para identificar y cartografiar los eventos de interés, de una manera eficiente en áreas de gran tamaño como cuencas.
- Proponer y definir los indicadores visuales para identificar y localizar movimientos en masa mediante las herramientas de Google Earth Pro.
- Proponer una caracterización geométrica básica con las herramientas de Google Earth Pro, de acuerdo a la escala de trabajo con el fin de estimar la magnitud del evento.
- Proponer el contenido del inventario de procesos de remoción en masa mediante la observación de imágenes satelitales.

De acuerdo la metodología propuesta se sugieren las siguientes convenciones cartográficas en el proceso de observación:

- Inicialmente en la localización de procesos se ubica un punto en la zona identificada como un movimiento en masa. Este punto será registrado en la base de datos, sin embargo, esta observación y localización es preliminar, por lo que requiere de revisiones y validaciones posteriores.

- Una vez validada la existencia de un proceso de remoción en masa a partir de análisis multitemporales de imágenes en un punto inicialmente ubicado, se delimita con un solo polígono el área afectada por el movimiento, esto es las zonas de desprendimiento y deposición del material.

Aunque varios autores sugieren aplicar convenciones cartográficas detalladas para caracterizar partes específicas de los procesos de remoción en masa como la propuesta en la guía del SGC (2017), en el presente trabajo se propone delimitar las zonas inestables con un sólo polígono que identifique la zona afectada por el movimiento, debido principalmente a la escala de trabajo y el método empleado para los análisis de susceptibilidad y amenaza, que no diferencia entre las partes de un deslizamiento.

El uso de imágenes del terreno ha aumentado debido a la utilidad de la información que brinda en temas de identificación de coberturas y análisis de cambios en el tiempo. La calidad y tipología en los equipos de captura de la información han tenido un crecimiento exponencial conjunto con los avances tecnológicos. La interpretación de imágenes es un proceso que va desde la interpretación fotografías aéreas mediante pares estereográficos, hasta el uso de imágenes satelitales con sus diferentes bandas del espectro electromagnética de múltiple precisión y rango que son tomadas por sensores remotos instalados en satélites que orbitan la tierra.

4.3.1 Hipótesis para la realización del inventario mediante la metodología propuesta

Los deslizamientos inventariados o reportados que conforman los inventarios o catálogos de procesos a partir de información antecedente son en realidad amenazas materializadas, lo que implica la afectación a la comunidad o a algún tipo de actividad económica importante de la zona (cultivos, ganados, industrias, etc.). Sin embargo, los movimientos en masa también ocurren en zonas apartadas de los efectos antrópicos, sin afectar ningún bien económico o el diario vivir.

Debido a lo anterior se propone realizar el inventario de deslizamiento únicamente a partir de la identificación visual de imágenes satelitales, siendo la información inventariada verificada en campo de acuerdo a las posibilidades del proyecto.

Se propone utilizar las imágenes disponibles en el software Google Earth Pro®, con el fin de generar una herramienta de fácil acceso y aplicable para el levantamiento del inventario de deslizamientos en la etapa inicial. Entre las ventajas de la utilización de este software esta su facilidad de manipulación, la visualización tridimensional del terreno y la disponibilidad de imágenes de diferentes años para un mismo sitio, lo que permite realizar un levantamiento sistemático y multitemporal de movimientos en masa.

4.3.2 Unidades de inspección visual para la identificación de procesos

Una vez determinada la zona de estudio geográficamente se requiere realizar el levantamiento de información. Para hacerlo de una manera sistemática y ordenada, se proponen proyectar Unidades de Inspección Visual sobre el terreno que tienen por objetivo:

- Servir de referencia espacial al observador para realizar el levantamiento ordenadamente y de forma sistemática, permitiendo en cada unidad identificar los indicadores visuales de procesos de inestabilidad en una sola vista.

Como unidad de inspección visual se sugiere una malla cuadriculada de apertura 500 m, de acuerdo con la experiencia en el levantamiento de información para el registro de movimientos en masa. Con esas dimensiones de la cuadrícula y a una altura de observación menor a 1000 metros se pueden apreciar adecuadamente procesos pequeños, conformando así un adecuado inventario. En la Figura 4-3 se presenta una comparación entre dos tamaños diferentes de apertura de cuadrícula, utilizadas como guías espaciales en la identificación de procesos.

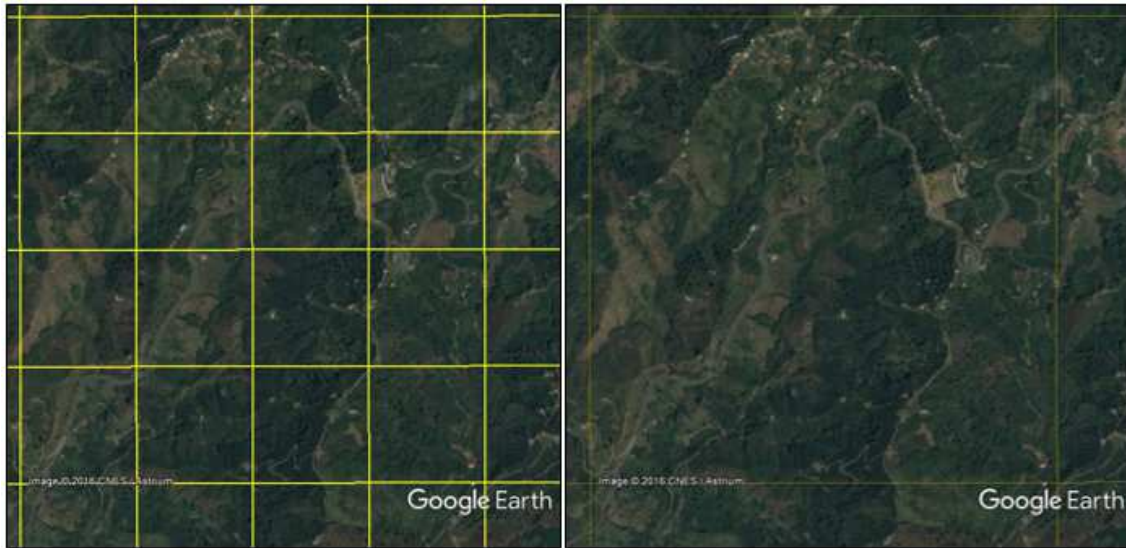


Figura 4-3. Comparación de las diferentes unidades de inspección visual para deslizamientos, a la derecha la malla con apertura de 2000 m y a la izquierda en amarillo la de 500 m x 500 m.

Google Earth Pro – Edición propia.

De la figura anterior se puede apreciar la división del terreno de cada una de las mallas, permitiendo un mayor detalle la malla de 500 m X 500 m, con referencia a la de 2.0 km de lado presentada en la parte derecha.

En la Figura 4-4 se presenta el detalle visualización que brinda la malla sugerida de 500 m de lado de cuadrícula, en la figura se observa un deslizamiento de tipo rotacional, con lo que se valida el tamaño de la malla propuesto para las unidades de inspección visual de acuerdo a la escala de análisis e información disponible.

La presente metodología es aplicada a cuencas hidrográficas, por lo que en la Figura 4-5 se presenta un ejemplo de división de la cuenca mediante la malla de unidades de inspección visual propuesta. La imagen que se presenta corresponde a la cuenca de la Quebrada El Rosario, que será la cuenca de ejemplo para la aplicación completa de la metodología.



Figura 4-4. Detalle de la malla de inspección de 500 m en una zona al sur de la ciudad de Manizales.

Google Earth Pro – Edición propia.



Figura 4-5. Vista de la malla de 500mX500m, para la cuenca de la quebrada El Rosario, se distingue el punto de salida de cuenca, para que se estime la dirección del flujo.

Google Earth Pro – Edición propia.

4.3.3 Indicadores visuales para identificación y localización de procesos

A continuación, se describen los conceptos con los que se propone realizar la interpretación de imágenes para el registro de zonas inestables:

- Los cambios abruptos de color son uno de los indicadores principales para identificar zonas deslizadas, generalmente cambios de tonalidades de verdes a cafés. En la interpretación se debe tener en cuenta que otro factor que genera un cambio abrupto en el color corresponde a preparación del terreno para cultivos, lo cual se puede confundir con un proceso de remoción en masa, sin embargo, se deben tener en cuenta los demás indicadores para validar la existencia o no de un movimiento en masa.
- Las formas de las zonas identificadas con cambios abruptos de color son características del tipo de proceso de remoción en masa posiblemente identificado. Áreas demasiado cuadrículadas corresponden a terrenos para cultivo, mientras que formas irregulares y onduladas dan idea de alguna deformación del material en superficial o en profundidad.
- La textura de la imagen brinda una idea del material presente en la zona y su posible grado de deformación y alteración. Para el caso de procesos de remoción en masa lentos y profundos, la textura será el principal indicador. Texturas lisas dan idea de materiales como suelos, mientras que una textura rugosa se puede asociar a materiales rocosos.
- La vegetación puede dar indicios de la presencia de zonas de mayor concentración de humedad y por tanto con mayor o menor grado de saturación de los materiales. En la vegetación se pueden apreciar arboles de gran porte, zonas arbustivas y cultivos antrópicos debidos al tono de las imágenes (Pastos, Arbustos, Bosque). En una misma imagen se puede comparar la longitud de las sombras de los árboles siendo un indicador importante de la deformación del terreno que causa el cabeceo de los árboles, variando la longitud de su sombra.

- La identificación de efectos antrópicos, hace referencia al uso del suelo y las actividades mismas del habitar el territorio que afectan los procesos naturales de la tierra. Por ejemplo, las adecuaciones al terreno necesarias para cualquier tipo de infraestructura, obras lineales, edificios. Respecto al habitar uno de los principales efectos es la disposición inadecuada de aguas y residuos. Con este indicador se busca darles alguna explicación y correlación a los movimientos identificados.
- La identificación de cauces naturales es importante en la medida que son pueden ser una causa de inestabilidad por efectos de la socavación lateral de las márgenes que causa inestabilidad en las laderas adedañas al cauce.

4.3.4 Registro de procesos de remoción en masa identificados

Una vez sean identificados los procesos de remoción en masa, es necesario realizar el registro de las características observadas en cada uno de los procesos, para formar el inventario de deslizamientos. Aunque existen propuestas para el contenido del registro, en el presente trabajo se presenta una propuesta de registro de información, consecuente a la herramienta utilizada Google Earth Pro. La información propuesta para el registro a partir de la observación del terreno se presenta en las siguientes tablas (Tabla 4-2, Tabla 4-3,

Tabla 4-4, Tabla 4-5,

Tabla 4-6 y Tabla 4-7).

Tabla 4-2. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a la calidad de la imagen y visibilidad.

POR LA CALIDAD DE IMAGEN Y VISIBILIDAD		
LR	Baja resolución, no verificable	Hace referencia a las imágenes más antiguas disponibles en las que se identifican colores pero difícilmente formas precisas debido a la calidad de los equipos para adquisición de la información. En Google Earth Pro aparecen diferentes calidades en la resolución de la imagen automáticamente dependiendo de la altura de visualización.
MR	Media resolución verificable	Se refiere a imágenes de hace algunos años, con en la que debido a la calidad de los equipos de adquisición y la reproducción de los mismos, sin embargo en éstas la magnitud del proceso es tan evidente es posible observar algunas características.
HR	Alta resolución, verificable	Son principalmente las imágenes más recientes. Son las mejores fuentes de información y es donde se requiere el mayor detalle en la observación. La altura de visualización puede brindar el detalle que se requiera en la identificación.
CN	Cubierto por nube	Hace referencia a áreas de interés cubiertas por nubes al momento de la toma de la imagen. Generalmente se encuentran en los análisis multitemporales. Sitio no verificable.

Tabla 4-3. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a las formas, tonos de color e interpretación de imágenes.

OBSERVACIÓN POR LAS FORMAS		
MA	Marca visible o cicatriz de proceso	Se refiere a marcas evidentemente visibles, en terminos de grietas y sombras en la vegetación, características de procesos de remoción en masa, de acuerdo al proceso de identificación.
PR	Proceso reciente	Hace referencia a una forma bien definida en la imagen, con un color de tonos terrosos y sin vegetación. En algunos casos se puede apreciar la masa de material deslizada, dando idea de la dirección al movimiento. Puede encontrarse junto a vías, líneas de conducción de fluidos, viviendas, entre otros.
PE	Proceso estabilizado	En la imagen se pueden apreciar obras de contención o control de procesos de inestabilidad. También la estabilización puede ser natural, es decir se identifica el proceso revegetalizado pero con marcas visibles.
OV	Obstruido por vegetación	Cuando no se evidencian las formas típicas de los procesos pero se sabe de alguna otra fuente de información validada de la ocurrencia de un proceso.

Tabla 4-4. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a la textura observada en la imagen.

OBSERVACIÓN POR LA TEXTURA		
TR	Textura rugosa	Brinda la idea de materiales frágiles y procesos de deformación del terreno profundos y con pocos efectos de meteorización.
TL	Textura lisa	Hace referencia a materiales homogéneos, generalmente formaciones de tipo igneo-metamórfico. También presenta la idea de importantes espesores de suelo residual y transportado, nivelado por efecto de las fuerzas naturales dominadas por la gravedad.

Tabla 4-5. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a los posibles detonantes físicos del proceso de inestabilidad.

OBSERVACIÓN POR POSIBLES DETONANTES FÍSICOS		
CU	Cambio uso del suelo	Aledaños al los proces identificados se pueden apreciar cultivos que dan la idea de la explotación agrícola del suelo.
IC	Infraestructura cercana o afectada	Los procesos de remoción en masa pueden ser asociados con alguna infraestructura afectada (vias, vivienda, conducciones, etc.), que se construyen a media ladera, generando cargas desestabilizantes al terreno.
CC	Cauces cercanos	Los cauces naturales se ven afectados por los procesos de remoción en masa y de igual manera son causa de los mismos generalmente por efectos del proceso de socavación lateral que desestabiliza las laderas que controlan el margen del cuerpo de agua.
GE	Ganadería extensiva	La ganadería extensiva provoca suelos desnudos, susceptibles a procesos de remoción de todo tipo, debidos al flujo del agua directo y pérdida de resistencia del material.
ED	Escorrentia Directa	Corresponde a procesos de inestabilidad, producidos por una carga de agua que concentra el flujo en una zona generando el deslizamiento, generalmente con impermeabilización antrópica, la cual genera mayor velocidad y erosividad del flujo en eventos cortos de gran intensidad.

Tabla 4-6. Nomenclatura para la identificación y clasificación de procesos de remoción en masa, debidas a la evaluación multitemporal del sitio o proceso localizado.

OBSERVACIÓN POR LA EVALUACIÓN HISTORICA		
TI	Temporalmente influyentes	Corresponde a eventos que se pueden identificar en una ventana de tiempo corta, es decir que se delimita el tiempo para entender el la causa proceso. Hace referencia al análisis multitemporal de imágenes, en donde en una imagen anterior no hay proceso y en una mas reciente si.
TN	Temporalmente no influyentes	Son los eventos que solamente aparecen en una fotografía, generalmente en la de mayor calidad para la interpretación o son debidos a la falta de imágenes, es decir que no se puede hacer una evaluación multitemporal.

Tabla 4-7. Nomenclatura para la clasificación de procesos de remoción en masa, clasificación propuesta por Cruden & Varnes 1998, adaptada en PMA:GCA (2007).

CLASIFICACIÓN DE PROCESOS (CRUDEN & VARNES 1998)		
TRANS	Deslizamientos traslacionales	La metodología para la clasificación utilizada en el presente trabajo, corresponde a la propuesta en el PMA:GCA (2007), basada a su vez en Cruden & Varnes (1998). Se debe tener en cuenta que de acuerdo a la metodología de interpretación de imágenes no es posible conocer características detalladas de los procesos de remoción en masa como los materiales involucrados, actividad, entre otras, que se deberán validar en el trabajo de campo.
ROTAC	Deslizamientos rotacionales	
DEFGP	Reptaciones o deformaciones gravitacionales profundas	
FLUJO	Flujo	
EROHC	Proceso de erosión hídrica concentrada	
FLUJO	Flujos de tierras, detritos o rocas	
CAIDA	Caídas de material	
VOLCA	Volcamiento de roca, suelos o detritos	
NOIDR	Proceso No Identificable, pero posible, validar en campo	

Al añadir el punto de posición en Google Earth Pro, se extiende una ventana para la edición de las propiedades de esa ubicación. En esa ventana se agregan características como: el nombre, descripción, estilo y color de la etiqueta, iconos, opciones de visualización entre otras. En la descripción se registran los indicadores visuales para identificar los deslizamientos descritos en las tablas anteriores. En la Figura 4-6 se presenta un ejemplo del registro en la pestaña de propiedades de un punto en Google Earth Pro.

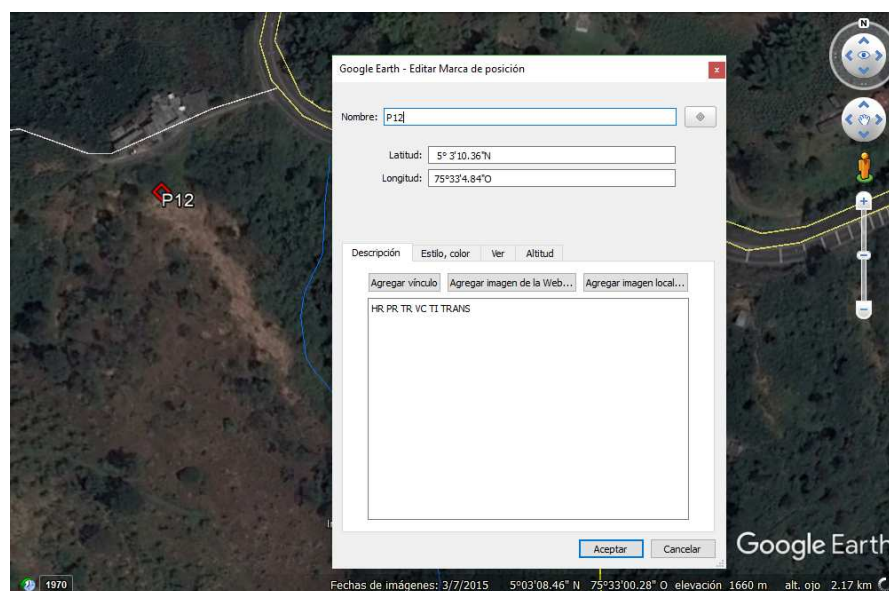


Figura 4-6. Pestaña de edición de una nueva Marca de Posición en el visor de Google Earth Pro. Edición propia.

De la descripción realizada se obtiene que la imagen disponible para esa fecha tiene una Alta Resolución para la identificación de procesos (HR), el punto corresponde a un Proceso Reciente (PR) debido a abrupto cambio de color café en una zona llena de vegetación de porte medio, se aprecia la forma alargada del color que se asocia a la masa deslizada que se extiende conforme la ladera, la textura es Lisa (TL) brindando la idea de una fuerte meteorización describiendo el material como suelo.

El posible detonante del proceso puede ser la Infraestructura Cercana (IC), correspondiente a una vía veredal y una vivienda. La clasificación temporal hace referencia a un proceso temporalmente importante (TI), pues en la evaluación temporal del terreno se observa una ventana de tiempo de ocurrencia corta.

Finalmente, el proceso identifica se clasifica como como un deslizamiento translacional (TRANS), debido a que no se observa una gran masa movilizada representada por el tono de la imagen, no se observan grietas en forma de media luna, no corresponde a caídas ni volcamientos pues la pendiente y la forma no corresponden a éstos.

4.3.5 Evaluación multitemporal de procesos identificados

Una de las principales ventajas del software Google Earth Pro, utilizado en la metodología es la posibilidad de ver imágenes de un mismo lugar en diferentes épocas, generalmente de 3 a 5 imágenes diferentes, dependiendo de la información disponible. Se propone que a cada una de las imágenes de diferente fecha se le realiza el proceso de identificación y descripción buscando una completitud temporal en el inventario.

Para activar la opción de imágenes históricas, desde la pestaña Ver, se activa la barra de tiempo, la cual muestra una barra azul en la que se marcan con en blanco el año aproximado en que hay imágenes disponibles, como se presenta en la Figura 4-7, en la que existen 4 años diferentes con imágenes disponibles.

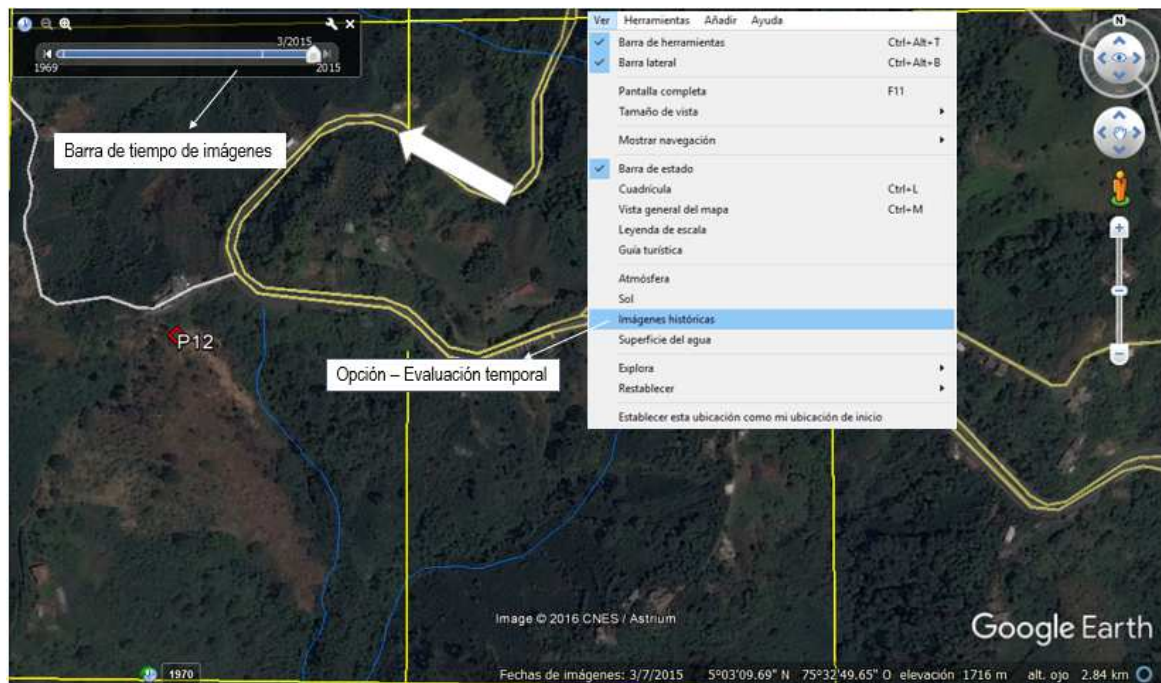


Figura 4-7. Herramienta de Imágenes Históricas de Google Earth Pro.

Google Earth Pro – Adaptación propia.

4.3.6 Caracterización geométrica y vectorización de procesos de remoción en masa

Una vez identificados los procesos es necesario realizar una caracterización geométrica de cada registro para estimar su magnitud para poder entender de una manera adecuada los posibles detonantes.

Para realizar la caracterización geométrica se utiliza la herramienta Regla, que se encuentra en la Barra de Herramientas del menú de Google Earth Pro. La herramienta de Regla se presenta en la Figura 4-8, tiene 6 subpestañas correspondientes a: Línea, Ruta, Polígono, Círculo, ruta de acceso en 3D y polígono en 3D. Para el presente trabajo se recomienda utilizar las herramientas de 3D pues tienen en cuenta el DEM de software.

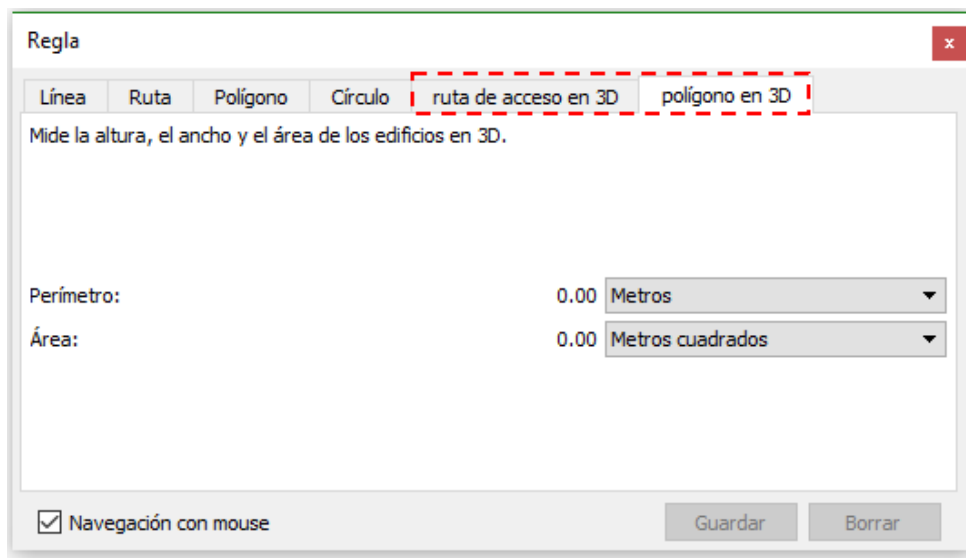


Figura 4-8. Detalle de la herramienta Regla, en rojo se resaltan las sub-herramientas más utilizadas para la caracterización geométrica de un proceso de remoción en masa

Google Earth Pro – Edición propia.

Las principales dimensiones sugeridas para la definición de la magnitud de los procesos de remoción en masa inventariados son:

- El ancho de la superficie de falla (W_f), en al menos dos secciones transversales representativas del movimiento.
- El ancho de la masa desprendida (W_m), en al menos tres secciones transversales representativas. La diferencia con el anterior es que la masa desprendida puede ser más ancha o angosta que la superficie de donde se desprende, debido a la misma naturaleza de cada tipo de procesos.
- Longitud de la superficie de falla (L_f), desde la corona o inicio del proceso hasta el límite de material desprendido, es difícil de identificar, debido a que el material movilizado se acumula en la zona baja de la superficie de falla.
- Longitud total (L_t), se refiere a la longitud de todo el movimiento en masa, es decir desde la corona hasta el límite más alejado de la masa deslizada.

- Área de masa desprendida (A_m), corresponde al área de la masa movilizada, sin tener en cuenta el área de la superficie de falla.
- Área de terreno desprendida (A_t), corresponde al área de la superficie de falla estimada de acuerdo a la tipología del proceso y observación visual de las características de la imagen, precisamente del tono del color.

El volumen movilizado es difícil medirlo a partir únicamente de la interpretación de imágenes, pues no se puede observar el espesor de la masa movilizada. Las características de la ladera se presentan como factores condicionantes de inestabilidad, por ejemplo, la pendiente.

Con la sub-herramienta de *ruta de acceso en 3D*, se trazan y adquieren todas las longitudes sugeridas para la caracterización geométrica de manera rápida y con alguna confiabilidad, se deberá registrar los valores obtenidos en un campo preciso del inventario de deslizamientos. La sub-herramienta *polígono 3D* es utilizada para calcular las áreas del movimiento, teniendo en cuenta el relieve del sitio

La digitalización de los procesos identificados es necesaria para la manipulación del inventario en un programa de SIG, que permite: generar consultas de acuerdo a las características descritas en el proceso de observación, realizar los análisis propios de susceptibilidad y de densidad de deslizamientos, almacenar la información de manera eficiente y ordenada y realizar la presentación del inventario en los mapas de amenaza y riesgo.

4.3.7 Ficha final de detección y registro de procesos

Finalmente, para el óptimo registro y manipulación de los procesos inventariados se propone realizar una base de datos, de acuerdo a los encabezados de cada columna presentados a continuación (ver Tabla 4-8).

Tabla 4-8. Encabezados sugeridos para la ficha final de detección y registro de procesos de remoción en masa.

Id_Inicial	Id_Final	Nombre	Calidad_img	Formas	Textura	Detonantes	Temporal	Tipo	...
<i>La los encabezados propuestos continuan hacia la derecha en una fila</i>									
...	Fecha	Latitud	Longitud	Wf (m)	Wm (m)	Lf (m)	Lt (m)	Am (m ²)	At (m ²)

Elaboración propia

De la tabla anterior se puede observar que la propuesta de registro contiene 18 columnas o datos, la mitad corresponden a información obtenida directamente de las mediciones sobre las imágenes, mientras que los otros indicadores son obtenidos del proceso de identificación y análisis de imágenes.

4.3.8 Validación del inventario de deslizamientos en campo

Una vez obtenido el inventario de deslizamientos, es necesario de la validación de la información interpretada. Esto es la correlación de lo observado en oficina con lo que se encuentra en el terreno.

Para la validación en campo de los registros del inventario, se recomienda utilizar el formato para el levantamiento de información conforme propuesto en el documento Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC & UNAL, 2016). Este formato es una adaptación para Colombia del formato propuesto por el Proyecto Multinacional Andino PMA:GCA (2007).

Debido a la complejidad en el llenado del formato análogo en campo, por la poca portabilidad de las hojas del formato y dificultad en el manejo y llenado, además por los elevados tiempos en la sistematización en oficina posterior a campo, se propone la utilización de una aplicación móvil desarrollada en el marco del presente trabajo.

En el desarrollo de la app se incluye toda la información que puede ser medida con los sensores incorporados en los dispositivos móviles, por ejemplo, la dirección y el

buzamiento de los movimientos en masa, las coordenadas de cada proceso (GPS), entre otras herramientas que permiten la optimización en la recolección, análisis e interpretación de la información.

4.3.9 Landslide Collector V0.0

LandSlide Collector es una aplicación móvil para la recolección y almacenamiento de datos correspondientes a los registros del inventario de deslizamientos. Se fundamenta en el formato modificado para la caracterización de movimientos en masa del *Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007)*. También propuesto en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

La aplicación fue pensada con el fin de facilitar la recolección de la información característica de procesos de remoción en masa en campo, utilizando los sensores con que disponen los dispositivos móviles actuales. Los sensores logran capturar datos como la dirección, el buzamiento, el geoposicionamiento y la toma de fotografía, permitiendo una adecuada caracterización de los procesos.

La importancia de este aplicativo radica en aprovechar las nuevas tecnologías para su uso en las buenas prácticas en campo del ingeniero y la portabilidad de los dispositivos celulares, pues llenar formatos en papel o de manera análoga, utilizando equipos adicionales como GPS y cámara fotográfica, hacen que la actividad observacional en cada proceso o deslizamiento sea monótona, poco ergonómica, lenta y con mayor posibilidad de presentar errores en el registro de la información (tachones, caligrafía de mala calidad, ausencia de registro fotográfico, mal manejo o captura de coordenadas, etc.).

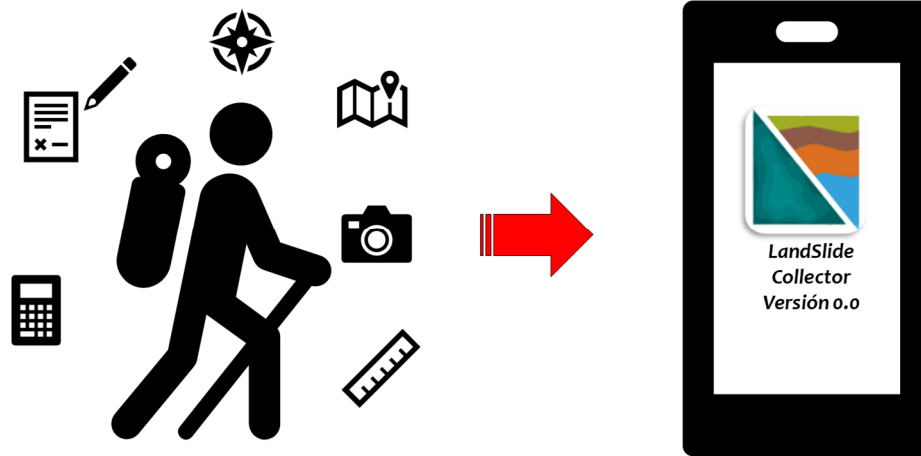


Figura 4-9. Portabilidad de información y herramientas para el trabajo de campo en la validación del inventario de deslizamientos.

La aplicación permite generar un archivo .csv con los datos obtenidos de manera organizada y carpetas donde se encuentra el registro fotográfico por cada proceso. Esto en tiempo inmediato y con opción de poder enviar o compartir el archivo mediante aplicaciones de mensajería instantánea o correo electrónico. La aplicación en su versión inicial fue desarrollada para sistema operativo Android.

Para el llenado de la información, se cuentan con múltiples tipos de entrada de datos como de texto, numéricos y opciones barras porcentuales. A continuación, se presentan algunos ejemplos de la interfaz de LandSlide Collector.

- *Inicio de registro:* al iniciar el aplicativo, aparece el módulo de descripción general del proyecto, se solicita el nombre del proyecto, el profesional encargado del levantamiento y la fecha de levantamiento, como se puede observar en la siguiente figura.

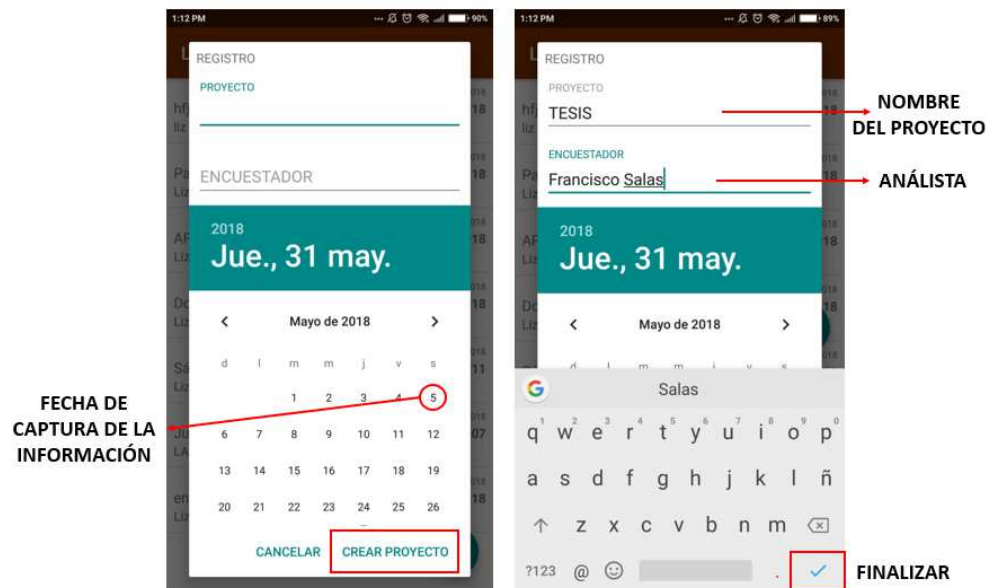


Figura 4-10. Inicio de aplicación y registro de información base.

- Creación de registro de deslizamientos: una vez se haya creado el proyecto la aplicación presenta la opción de registrar cuantos procesos o deslizamientos se requieran. Como se observa en la Figura 4-11.



Figura 4-11. Creación del registro de deslizamientos.

- Caracterización de un deslizamiento: para cada proceso registrado se presenta el módulo para la caracterización de deslizamientos. En este espacio también aparece el botón para capturar fotografías, siendo guardadas en carpetas independientes de acuerdo al identificador del proceso y con las coordenadas donde fueron tomadas.

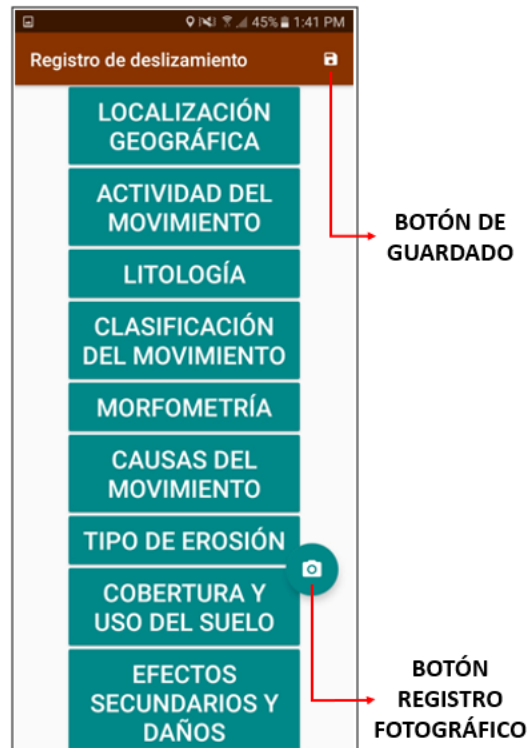


Figura 4-12. Registro información del deslizamiento

Cada uno de los aspectos que se presentan corresponden a información base en el levantamiento de información de un proceso de remoción en masa. En la siguiente figura se presentan las capturas de pantalla de algunos de los aspectos requeridos para el registro de la información.

Figura 4-13. Aspectos del levantamiento para un registro información del deslizamiento

Los sensores del dispositivo celular utilizados son principalmente el GPS y el giroscopio, que se utilizan para la ubicación espacial de puntos y la medición de ángulos respectivamente. En la siguiente figura se presenta la utilidad de los dos sensores principales que requiere la aplicación para su buen rendimiento en el trabajo de campo.

Figura 4-14. Utilidades de sensores en equipos celulares dentro de LandSlide Collector V0.0

Cada vez que una de las características del deslizamiento sea completamente diligenciadas, la aplicación indica que ya fue completada correctamente, mediante descriptores en color verde, como se presenta en la siguiente figura.

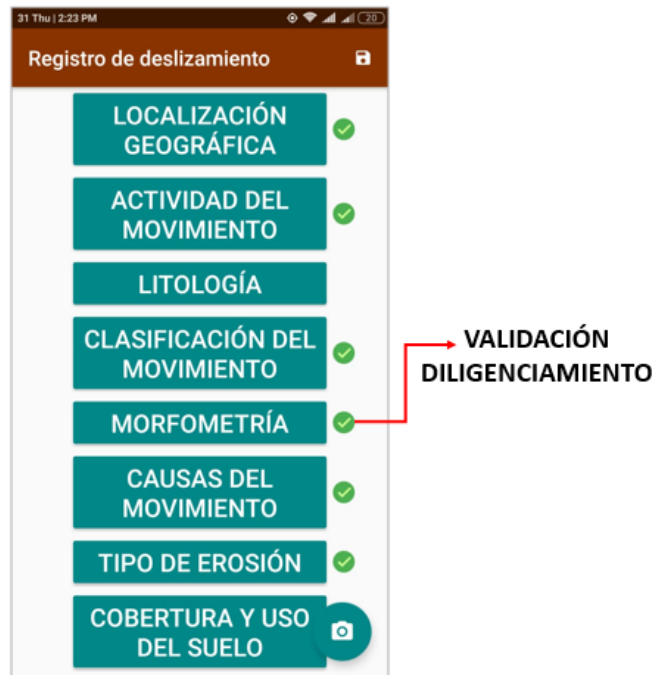


Figura 4-15. Ayudas visuales de validación diligenciamiento de información

- Generación de reporte e información: una vez se haya realizado el levantamiento de los procesos de remoción en masa, se requiere guardar la información en el equipo, generando un archivo en el que se presentan las descripciones realizadas en campo de cada uno de los deslizamientos y las carpetas de fotografías tomadas para cada registro del inventario. Se debe utilizar el botón de descarga de información para guardar la información levantada. Un ejemplo del resultado de la aplicación se puede apreciar en la siguiente figura, en donde se observan las carpetas con el registro fotográfico de los deslizamientos levantados y el archivo .csv con la información procesada.

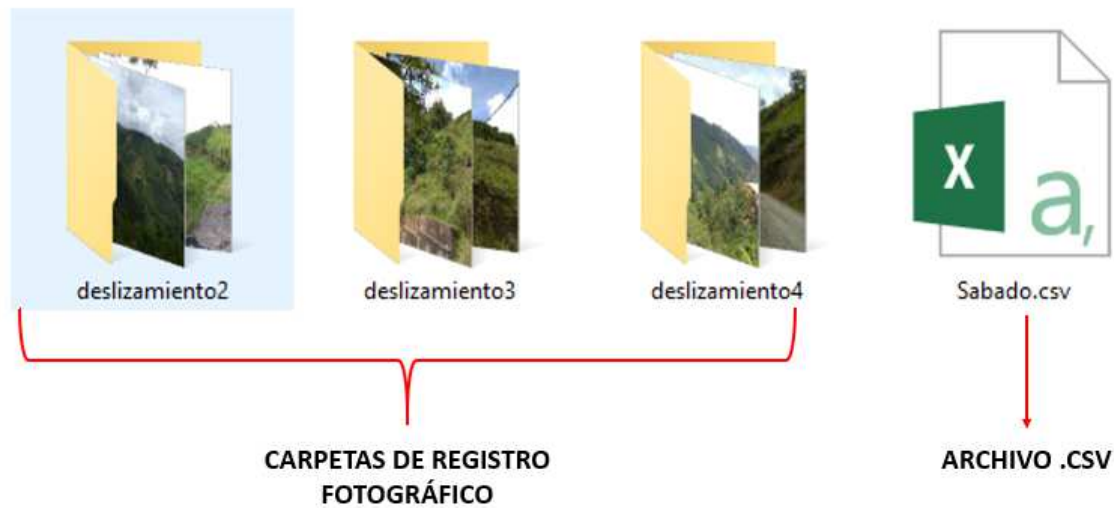


Figura 4-16. Producto final de LandSlide Collector Versión 0.0

Con la información del inventario de deslizamientos validada, se obtiene la base para los análisis de susceptibilidad y amenaza por procesos de remoción en masa.

4.4 Definición de los factores condicionantes de susceptibilidad a inestabilidad

Es difícil determinar las variables del terreno que determinan condiciones de inestabilidad para un área en particular, debido a la misma complejidad de los procesos de remoción en masa. En el presente trabajo no se define un límite de factores condicionantes, pero se propone como mínimo utilizar los siguientes para los análisis de susceptibilidad: la morfometría (aspecto, pendiente, curvatura), la geología, el cambio de la cobertura del terreno y el uso del suelo.

Con la denominada morfometría se pretende caracterizar geométricamente las laderas, tratando de buscar la relación entre zonas inestables y posibles geometrías características, para esto se propone utilizar los mapas de aspecto, pendiente y curvatura en planta, los cuales pueden determinar condiciones de las laderas que generan estabilidad.

El mapa de geología describe las características de los materiales presentes por lo que es un factor indispensable en los análisis de amenaza, pues dependiendo de las características de resistencia y comportamiento del material ante eventos detonantes se pueden generar eventos de movimientos de masa de suelos. El mapa de geología deberá ser caracterizado desde el punto de vista ingenieril, con el fin de proporcionar criterios que determinen zonas potencialmente inestables para la zonificación de amenaza.

El cambio de la cobertura hace referencia a una acción antrópica que identifica las zonas en las que el cambio de la capa vegetal ha sido importante cambiando de alguna manera las condiciones del suelo. Por ejemplo, zonas que en algún tiempo estaban cubiertas de bosques y que ahora son áreas de producción agrícola, pasaron estar protegidas de la lluvia y acciones de cargas a sufrir sus efectos directamente por la explotación intensiva del terreno. El mapa de cambio en la cobertura permite identificar dichas zonas en donde el cambio entre las condiciones naturales y las antrópicas es mayor.

El mapa de uso del suelo describe la vocación que se le da al terreno, también corresponde a un factor antrópico y a diferencia del mapa de cambio de la cobertura identifica en un tiempo actual la cobertura del terreno de acuerdo a aspectos propios del desarrollo de la sociedad, como por ejemplo zonas industriales, ganadería, agricultura extensiva, vías, entre otras.

A continuación se describen de manera más detallada los factores condicionantes de susceptibilidad propuestos para el presente trabajo.

4.4.1 Morfometría

En el presente trabajo como morfometría se definen los mapas de aspecto, pendiente y curvatura en planta, los cuales permiten definir la geometría de las laderas de una cuenca. La geometría de las laderas se entiende como la extensión en planta y en perfil, así como el gradiente de elevación y el grado de concavidad o convexidad del terreno. A continuación, se describen cada uno de los mapas que se proponen como morfometría.

▪ Aspecto

Se define como la orientación de la ladera (Capitani, Ribolini, & Bini, 2013) de acuerdo al ángulo de azimut. En la Figura 4-17 se presenta un mapa de aspecto sin clasificar, los colores representan las diferentes direcciones de la ladera. Los cuerpos de agua en color negro diferencian claramente los limites inferiores del aspecto.

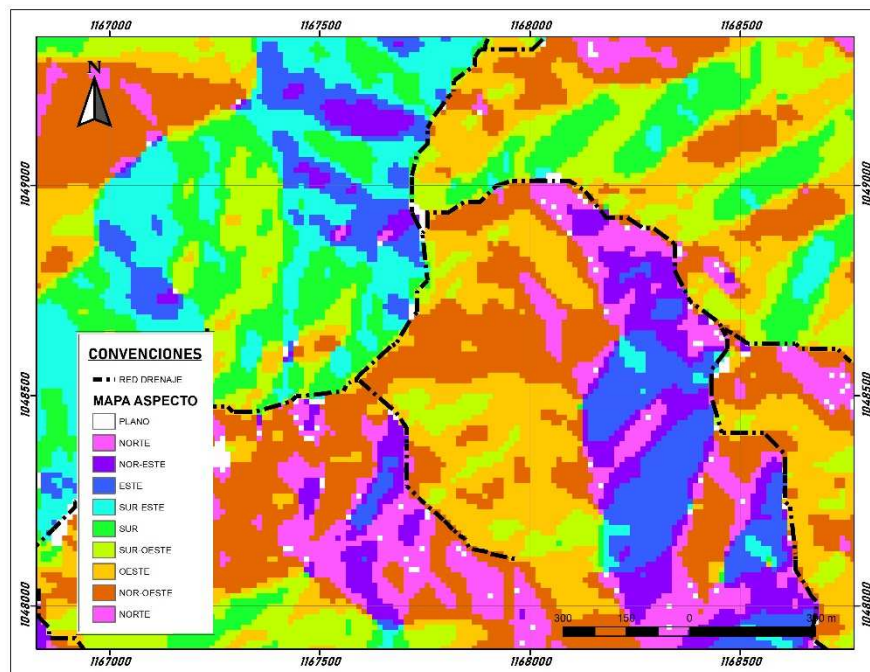


Figura 4-17. Mapa de aspecto sin clasificar, obtenido a partir del DEM.

Fuente: Elaboración propia.

En color azul se presentan las laderas cuya orientación es preferente hacia el este, mientras que en amarillo se presentan las que se dirigen al oeste. En color cian se observan las laderas orientadas al sur este y así de acuerdo a las convenciones presentadas.

Para la reclasificación del aspecto se propone realizar el análisis de los datos con los píxeles aledaños al píxel objetivo en un rango circular de radio de 2 celdas, debido a la escala de trabajo, es decir que se utilizarán los píxeles que están a 25 m del píxel de objetivo. Se propone utilizar como nuevo valor de píxel, el mismo valor de la mayoría de los datos seleccionados en el rango definido (estadísticas focalizadas).

Se obtienen límites ajustados del mapa de aspecto como se aprecia en la Figura 4-18, en la que se pueden apreciar áreas bien definidas que representan laderas individuales a diferencia del mapa sin clasificar en el que se observan píxeles individuales aislados.

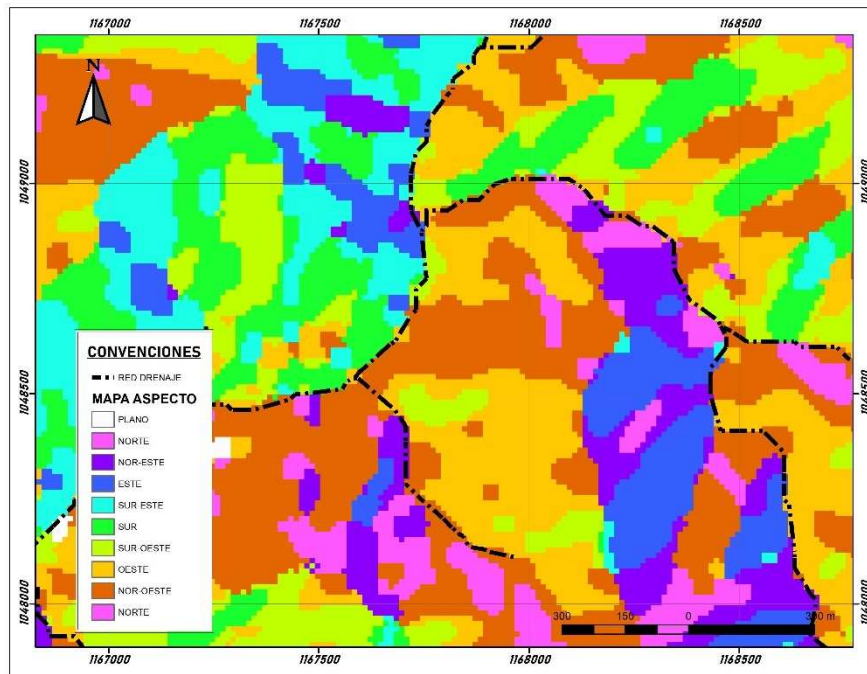


Figura 4-18. Mapa de aspecto clasificado a partir de estadísticas focalizadas en SIG.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis estadístico es posible que exista la misma cantidad de píxeles de un mismo valor, por lo que algunas celdas quedarán sin valor, para corregir esto se realiza un ajuste de los bordes de las áreas clasificadas también usando SIG. En la Figura 4-19 se presenta la metodología para la generación del mapa de aspecto.



Figura 4-19. Metodología para la generación del mapa de aspecto usando SIG.

La validación de la delimitación de laderas por aspecto se realizó visualmente mediante la proyección de las unidades de ladera obtenidas en Google Earth Pro, como se muestra en la Figura 4-20. En la figura se puede observar en líneas color naranja la delimitación de las laderas con el mapa de aspecto y como los procesos de remoción en masa que se observan como polígonos de borde color blanco se ubican en dichas laderas definidas. Las orientaciones obtenidas del mapa de aspecto también se validaron en la etapa de campo para algunas laderas de la cuenca del caso de estudio.



Figura 4-20. Vista en Google Earth Pro de las laderas delimitadas con el mapa de aspecto.

Elaboración propia – Vista de Google Earth Pro

Las posibles orientaciones de las laderas corresponden a la división cada 45° de una circunferencia, por lo que existen las posibilidades de orientación al norte, nor-este, este, sur-este, sur, sur-oeste, oeste, nor-oeste y plano que no tiene una orientación preferente.

▪ Pendiente

La pendiente se define como el grado de inclinación de un plano respecto a otro completamente horizontal. La pendiente de las laderas indica de la presencia de diferentes materiales y posibilidades usos del terreno. Una ladera con una pendiente determinada puede ser afectada por procesos naturales regidos principalmente por acción de la gravedad, por ejemplo, en una ladera de alta pendiente el flujo de escorrentía tendría mayor velocidad y por ende mayor poder erosivo.

Los rangos de pendientes propuestos para el análisis de susceptibilidad del terreno corresponden a los presentados en la Tabla 4-9, propuestos en la literatura (SGC, 2017) (Zuidam, 1986).

Tabla 4-9. Rangos de pendiente para el análisis de susceptibilidad por procesos de remoción en masa

INCLINACIÓN (°)	PROCESOS CARACTERISTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0 -2	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable
2 -4	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluxión) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4 -8	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8 -16	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluxión periglaciara, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos
16 -35	Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos
35 -55	Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudación de escarpe", susceptible a rodamiento de rocas.

(SGC, 2017; Zuidam, 1986)

La clasificación de pendientes descrita en la tabla anterior, permite caracterizar el terreno de acuerdo a procesos de remoción en masa característicos y condiciones del terreno. Con la clasificación de pendientes también se busca tener en cuenta que la pendiente permite una delimitación adicional del terreno, ya que generalmente se presentan diferencias abruptas de pendiente en una misma ladera producto de la morfodinámica del relieve, que es acelerada por los efectos antrópicos, como la construcción de zonas de corte y relleno para la ubicación de infraestructura. La metodología para la obtención del mapa de pendientes se presenta en la



Figura 4-21. Metodología para la generación del mapa de pendientes usando SIG.

Elaboración propia

▪ Curvatura

La curvatura es la medida del grado de concavidad o convexidad del terreno y es obtenida a partir de procesamiento en SIG, teniendo como insumo el modelo de elevación digital (DEM). La curvatura corresponde a la segunda derivada de la superficie; hay dos tipos de curvatura definidas como de forma en perfil y forma en planta, la primera es obtenida en la misma dirección de la máxima pendiente y la segunda perpendicular a esa dirección (“Curvatura—Ayuda | ArcGIS Desktop”, 2018). En la Figura 4-22 se presenta la descripción

algebraica de la superficie y el cálculo de la curvatura general y curvatura en planta para un pixel central en un arreglo de 3 x 3 píxeles.

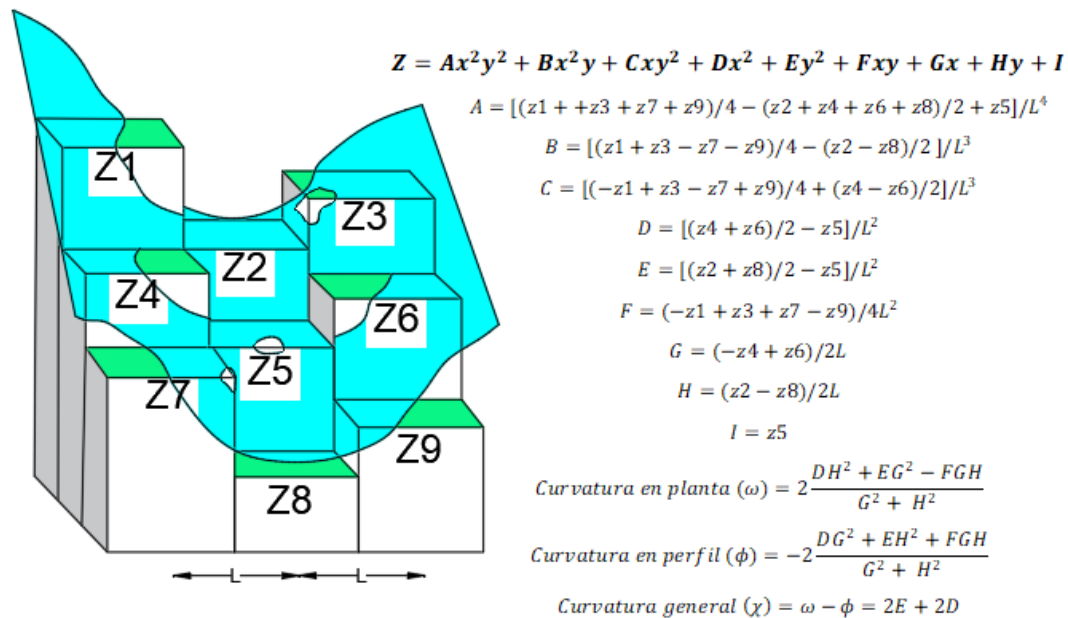


Figura 4-22. Descripción del cálculo de Curvatura usando SIG.

ArcGIS Desktop Help (Moore, Grayson, & Ladson, 1991)

Un valor de curvatura en planta positivo se interpreta como una superficie divergente (convexa), si es negativo corresponde a una convergente (cóncava). Una superficie divergente disminuye la concentración flujo de escorrentía, mientras que una convergente lo aumenta, siendo zonas favorables a procesos de inestabilidad (SGC, 2017). En la Figura 4-23 se pueden observar las direcciones del flujo superficial preferentes de acuerdo a la curvatura en planta.

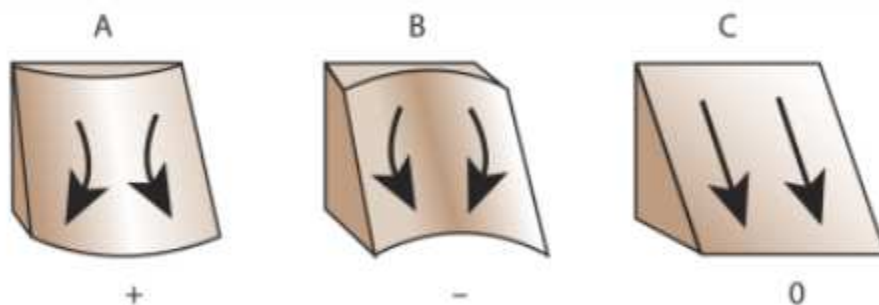


Figura 4-23. Representación gráfica de la curvatura en planta.

(“Función de curvatura—Ayuda | ArcGIS for Desktop”, 2018)

En la figura anterior se puede observar como para la curvatura en planta negativa existe una concentración del flujo de agua. Teniendo en cuenta lo anterior es difícil darle un significado físico a un mapa de curvatura en planta no clasificado, pues los valores positivos y negativos pueden variar entre píxeles aledaños.

Para brindarle un significado general a la curvatura en planta, se propone dividir el terreno zonas homogéneas de ladera y calcular el valor de curvatura para cada zona. Las zonas homogéneas de ladera se definen como la intersección de los mapas de aspecto y de pendientes clasificados (aspecto \cap pendiente). Esto considerando que una ladera de puede tener zonas con diferentes pendientes correspondientes a escarpes, zonas de pendiente intermedias e incluso zonas de depositación, que, aunque se disponen en la misma orientación pueden tener una curvatura en planta diferente.

Para definir la curvatura en planta para cada zona homogénea de ladera se propone hallar la asimetría, que estima el grado de simetría de una serie de datos respecto a la distribución estadística normal como se puede observar en la Figura 4-24. Una distribución sesgada a la izquierda quiere decir que la cola de la distribución normal de los datos es más alargada hacia la izquierda, lo que significa que los valores de curvatura tienden a un valor positivo es decir divergente, contrario sería una asimetría derecha que describiría una zona convergente. El conjunto de datos para el cálculo de la simetría son los píxeles individuales de cada zona homogénea de ladera.

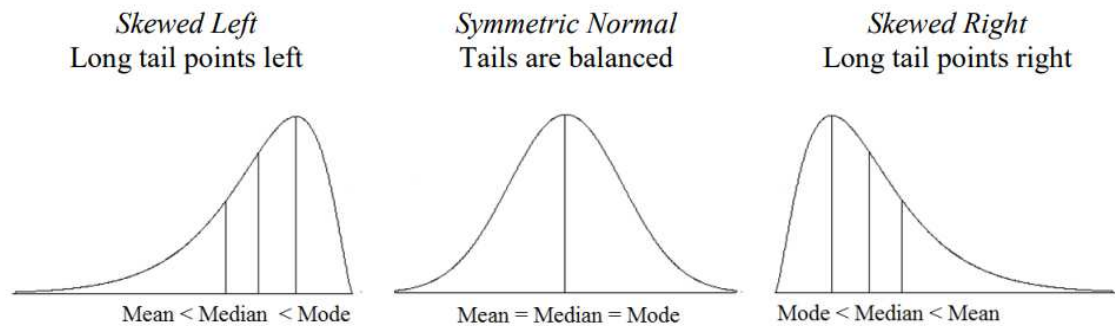


Figura 4-24. Representación gráfica de la posible simetría de una serie de datos,
(Doane & Seward, 2011)

El parámetro estadístico de asimetría se define de acuerdo a los momentos de segundo y tercer orden de la distribución normal de los datos. Para esta reclasificación se propone utilizar el tercer momento estadístico denominado como el coeficiente de asimetría de Fisher (Doane & Seward, 2011), descrito por la siguiente ecuación:

$$g_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{N * S^3}$$

En la que g_1 corresponde al valor del coeficiente de Fisher, X_i el valor de curvatura en planta de cada uno de los pixeles de las zonas homogéneas de ladera que conforman el conjunto de datos, \bar{X} es la media de los valores de curvatura en planta, N es la cantidad de datos y S corresponde a la desviación estándar del conjunto de datos.

Para llevar a cabo los análisis se utilizan herramientas de análisis estadísticos por zonas que vienen incorporadas en los softwares SIG. Las herramientas descritas tienen la capacidad de estimar los parámetros estadísticos básicos: cantidad de datos, suma, promedio, mediana, desviación estándar, valor mínimo, valor máximo, rangos de valores, entre otros. Una vez obtenidos los mapas con los valores requeridos para el cálculo de la asimetría, se emplea el álgebra de mapas para hallar el valor de la asimetría para cada zona homogénea de ladera.

Se propone la clasificación de los rangos de asimetría obtenidos para cada una de las zonas homogéneas de ladera de acuerdo a nueve rangos correspondientes a los cuantiles de los datos. La propuesta de clasificación brinda la posibilidad de definir si el factor curvatura aporta en la zonificación de amenaza. En la Figura 4-25 se puede apreciar el diagrama de flujo propuesto para el mapa de curvatura.



Figura 4-25. Metodología para la generación del mapa de curvatura usando SIG.

Elaboración propia

Un ejemplo del mapa de curvatura sin clasificar se puede observar en la Figura 4-26, en la que se presenta el cálculo de la curvatura en planta píxel a píxel. El mapa de curvatura

clasificado se presenta en la Figura 4-27. Al comparar los dos mapas existe una clara diferencia debida a la unidad de análisis, pues en el mapa clasificado se obtuvo un rango de curvatura en planta para las zonas homogéneas de ladera definidas.

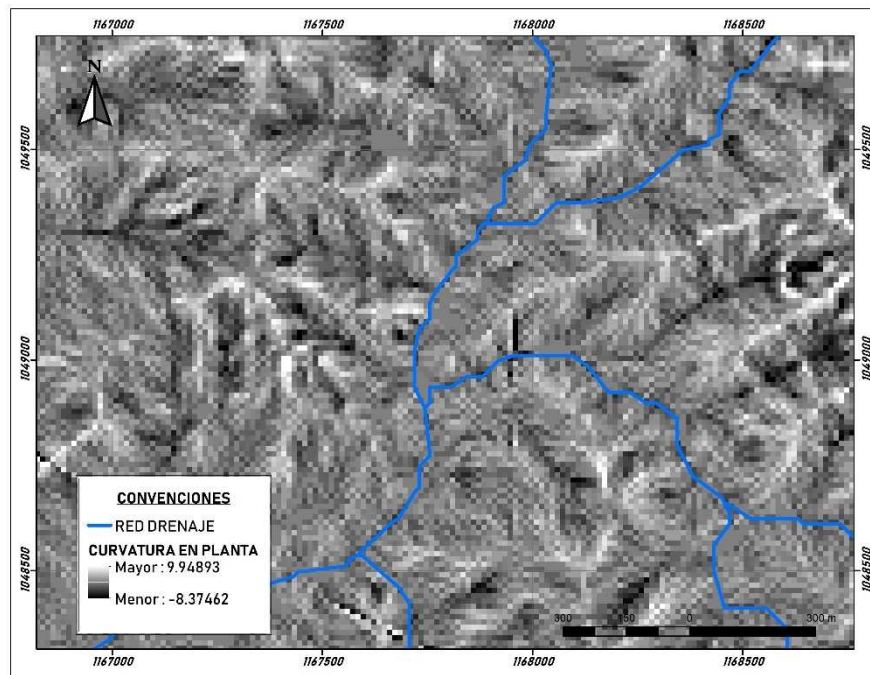


Figura 4-26. Mapa de curvatura sin clasificar obtenido a partir del DEM.

En el mapa clasificado se puede observar en color purpura las zonas que se consideran planas respecto a la curvatura en planta es decir zonas en la que el flujo de escorrentía sigue la misma dirección de la pendiente máxima, las zonas más claras en escala de grises en el mapa corresponden a zonas convexas en las que la dirección del flujo de escorrentía diverge, mientras que las áreas más oscuras corresponderán a zonas de ladera cóncavas, en las que se espera una concentración mayor de flujo de escorrentía y por ende mayor posibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa.

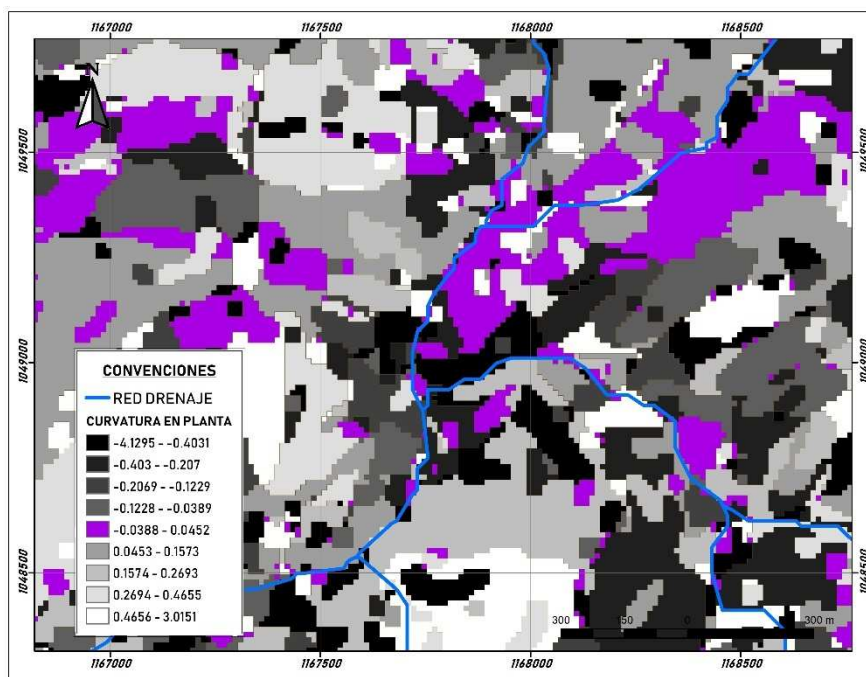


Figura 4-27. Mapa de curvatura clasificado a partir de la propuesta descrita.

En el trabajo de campo se validó visualmente el significado del valor de la curvatura en planta para las zonas homogéneas de ladera encontrando congruencia entre lo calculado y lo observado. Aunque se puede ahondar mucho en el tema de la interpretación del mapa de curvatura en planta, se considera adecuada la propuesta presentada, sin embargo, es posible validar y calibrar la clasificación con mediciones adicionales en campo a escalas de información detalladas, siendo un trabajo que se encuentra fuera del alcance del presente documento, pudiendo ser considerado un estudio particular.

4.4.2 Geología

La geología es uno de los factores condicionantes principales para la ocurrencia de procesos de remoción en masa, pues claramente las masas movilizadas cuentan con características físicas y mecánicas propias que se definen de acuerdo a su formación y composición.

Para la elaboración del mapa de geología se requiere del análisis de información antecedente disponible. Para la escala de análisis se recomienda la elaboración de mapas

de geología para ingeniería que permiten estimar las características de los materiales, en términos de litología, origen, composición física y química, estructura, comportamiento mecánico, entre otros, que permiten entender los posibles mecanismos de falla que se puedan presentar en cada material identificado.

En la guía de referencia se propone la elaboración del mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), Las UGS “corresponden a un conjunto (homogéneo) de materiales geológicos que afloran en la superficie, que provienen del mismo origen y conservan en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánico, hasta algunas decenas de metros por debajo de la superficie del terreno” (SGC, 2017, p. 66).

Inicialmente se deben diferenciar los tipos de materiales entre suelos y rocas, pues de esto dependerá el tipo de mecanismo de falla que se pueda presentar o en general la susceptibilidad a movimientos. Para la definición de las UGS se recomienda realizar estudios y análisis de los siguientes parámetros de los materiales presentes: la génesis, la litología, las propiedades ingenieriles, la clasificación geomecánica, el grado de meteorización y los rasgos estructurales.

Una descripción de cada uno de los parámetros se presenta a continuación, sin embargo, respecto al tema se recomienda aplicar la metodología detallada presentada en el documento guía del Servicio Geológico Colombiano (2017), siendo la autoridad nacional en el tema. La metodología sugerida es producto de los trabajos de geología para ingeniería y de la experiencia de expertos en la elaboración de este tipo de mapas a nivel nacional, recopilada en mesas de trabajo y reuniones llevadas a cabo en el marco de la construcción del documento mencionado.

- Génesis:
- Litología:
- Propiedades ingenieriles:
- Clasificación geomecánica:
- Grado de meteorización:
- Rasgos estructurales:

4.4.3 Cambio en la Cobertura del Terreno y Uso del Suelo

El mapa de cambio en la cobertura del terreno y el de uso del suelo hacen parte de las variables definidas como producto de las actividades humanas o antrópicas. El primero corresponde al mapa producto del análisis temporal de la cobertura del terreno, determinando zonas de cambio en la cobertura, entre el tiempo actual y un tiempo pasado. El segundo mapa se obtiene a partir del análisis de cobertura en el tiempo actual enfocado a las actividades de la sociedad.

De manera similar a la capa de geología, para la generación de las variables de cambio en la cobertura y uso del suelo se propone desarrollar lo descrito en la guía del Servicio Geológico Colombiano (2017), pues se realizó un importante trabajo en la asociación del tipo de cobertura con los procesos de inestabilidad. En el presente trabajo se introducen algunas propuestas en la manipulación y procesamiento de la información temática para la generación de los mapas. En la Figura 4-28 se presenta la metodología general sugerida para la elaboración de los mapas de cambio de cobertura y uso del suelo.

Para la realización del mapa de cambio de cobertura se requiere de dos coberturas con una diferencia temporal de no más de 10 años, la cobertura más reciente se denomina capa de cobertura de la tierra del tiempo actual (CCT-t1) y la más antigua capa de cobertura de la tierra en el tiempo anterior (CCT-t0). Reclasificando la capa de cobertura del tiempo actual (CCT-t1) se obtiene la capa de uso del suelo actual (CUS-t1). Comparando las dos capas de cobertura se obtiene la capa de cambio de la cobertura (CC).

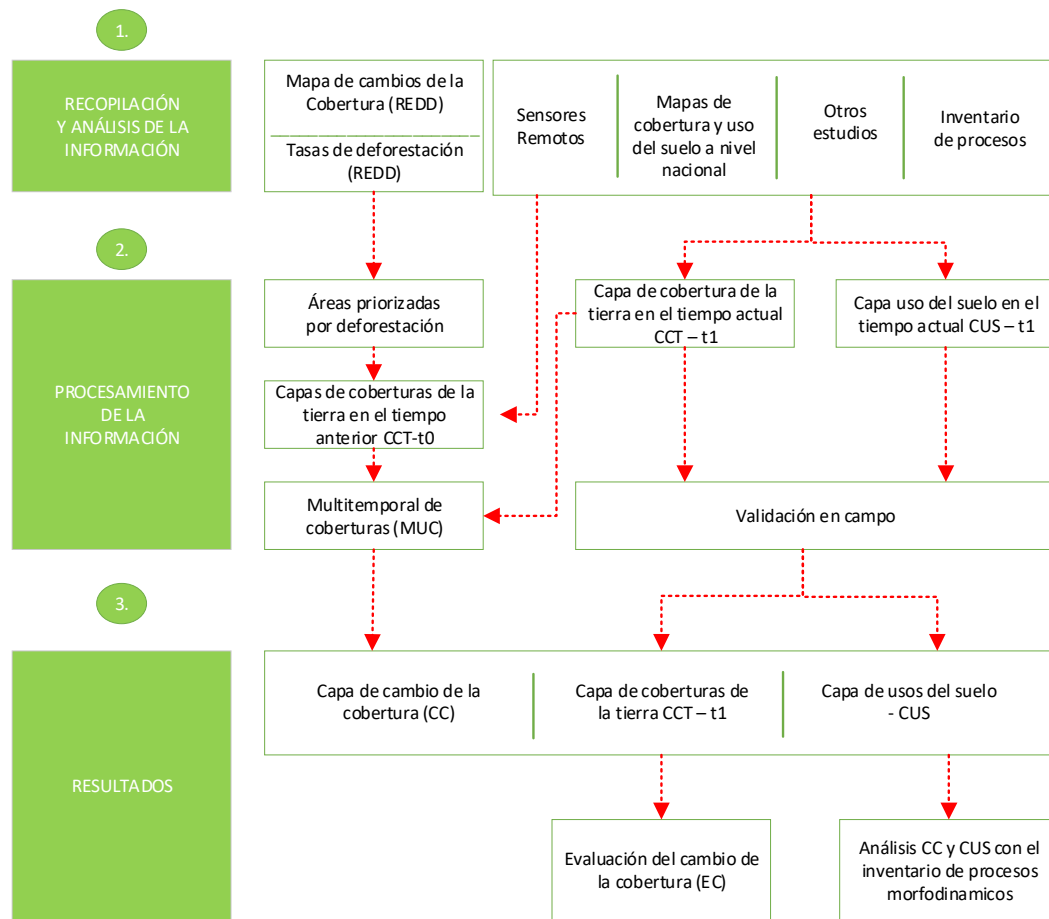


Figura 4-28. Metodología para la elaboración de los mapas de cambio de cobertura y usos del suelo.

(SGC, 2017)

Para la clasificación de la cobertura del terreno se propone la aplicación de la metodología Corine Land Cover adaptada para amenazas por procesos de remoción en masa por el SGC (2017), que a su vez fue elaborada a partir de los trabajos de la adaptación de la metodología Corine Land Cover general para el territorio colombiano realizada por el IDEAM (2010) (Martínez Ardila & Murcia García, 2010). La clasificación de cobertura Corine Land Cover y el uso del suelo asociadas a movimientos en masa se presenta en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10. Clasificación de cobertura mediante Corine Land Cover hasta nivel II asociada al uso del suelo.

ID	COBERTURA DEL TERRENO		USO DEL SUELO	
	NIVEL I	NIVEL II	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
1	1. Territorios artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	Asentamiento	Residencial
2				Comercial
3		1.2. Zonas Industriales o comerciales y redes de comunicación	Infraestructura	Industrial
4				Infraestructura y transporte
5				Recreacional, deportivo o turístico
6				Transporte
7		1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	Minería	Materiales de construcción
8				Metales radiactivos
9				Minerales no metálicos
10				Minerales energéticos
11				Piedras preciosas
12				Disposición de materiales líquidos
13				Disposición de materiales sólidos
14			Otros usos	Mina en abandono
15	2. Territorios agrícolas	2.1. Cultivos transitorios	Agricultura	Cultivos transitorios intensivos
16				Cultivos transitorios semintensivos
17				Producción
18		2.2. Cultivos permanentes	Agricultura	Cultivos permanentes intensivo
19				Cultivos permanentes semintensivo
20				Producción
21		2.3. Pastos	Ganadería	Pastoreo semintensivo
22				Pastoreo intensivo
23			Otros usos	Tierras en descanso
24				Recreacional

ID	COBERTURA DEL TERRENO		USO DEL SUELO	
	NIVEL I	NIVEL II	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
25		2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	Agricultura	Producción
26			Agroforestal	Sistemas combinados de agricultura y forestería
27			Agrosilvopastoril	Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería
28			Agropecuario	Cultivos permanentes semintensivos con pastoreo extensivo
29			Agrosilvopastoril	Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería
30	3. Bosques y áreas seminaturales	3.1.1. Bosques Natural	Conservación	Protección
31		3.1.2. Bosques Seminatural	Conservación	Protección
32				Producción - Protección
33		3.1.3. Bosques Plantación forestal	Forestal	Sistema forestal productor (FPD)
34				Sistema forestal protector (FPR)
35		3.2.1. Herbazal. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Conservación	Protección
36			Otros usos	Pastoreo
37		3.2.2. Arbustal. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Conservación	Producción
38				Protección
39		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Agroforestal	Producción - Protección
40			Conservación	Protección
41			Otros Usos	Tierras en descanso
42		3.3.1 Otras áreas sin vegetación	Sin uso	Afectación
43		3.3.2. Afloramientos rocosos. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Sin uso	Protección

ID	COBERTURA DEL TERRENO		USO DEL SUELO	
	NIVEL I	NIVEL II	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
44		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Sin uso	Afectación
45		3.3.4. Zonas quemadas. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Otros Usos	Tierras en descanso
46	4. Áreas húmedas	4.1. Áreas húmedas continentales	Conservación	Protección
47			Sin uso	Protección
48	5. Superficies de agua	5.1. Aguas continentales naturales	Cuerpos de Agua Naturales	Cuerpos de agua naturales
49		5.2. Aguas continentales artificiales	Cuerpo de Agua Artificiales	Cuerpos de agua artificiales
50		5.3. Aguas marítimas	Cuerpos de Agua Naturales	Cuerpos de agua artificiales

Adaptación propia - SGC (2017).

En la tabla anterior y para como propuesta metodológica propia se realizó el ajuste de la clasificación Corine Land Cover correspondiente a Bosques y áreas seminaturales, que inicialmente clasificaba coberturas hasta de nivel III. En este trabajo se propone ajustar la clasificación hasta una clasificación nivel II como se muestra en la tabla.

Se recomienda relacionar temporalmente las imágenes seleccionadas para la generación del mapa de cambio de cobertura con las fechas del inventario de deslizamientos con el fin de estimar la influencia del cambio de la cobertura en la ocurrencia de movimientos de terreno.

La elaboración de la capa de cobertura de la tierra en el tiempo anterior (CCT-t0) se obtiene a partir de información antecedente principalmente de la priorización de zonas de deforestación propuestas en el programa del IDEAM: Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD). Entre otras fuentes de información como mapas de cobertura disponibles de estudios adelantados por el IGAC a nivel nacional y a nivel local las entidades de planeación territorial y corporaciones autónomas regionales.

Para la elaboración de los mapas de cobertura del tiempo actual (CCT-t1) y anterior (CCT-t0) se utiliza el software libre QGIS, que cuenta con una extensión especializada en el

análisis con imágenes satelitales llamado: Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), el cual permite realizar las clasificaciones y procesamiento de imágenes necesarios para la construcción de los mapas. El software mencionado permite la obtención, preprocesamiento, análisis, filtrado de imágenes satelitales para la generalización de los mapas de cobertura.

La información del programa Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD) se encuentra disponible en el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC) para Colombia administrado por el IDEAM en la web: <http://smbyc.ideam.gov.co>. La plataforma SMBYC cuenta con una guía completa para la descarga de la información disponible. En la Figura 4-29 se presenta la metodología particular para la construcción del mapa de cambio de cobertura de la tierra.

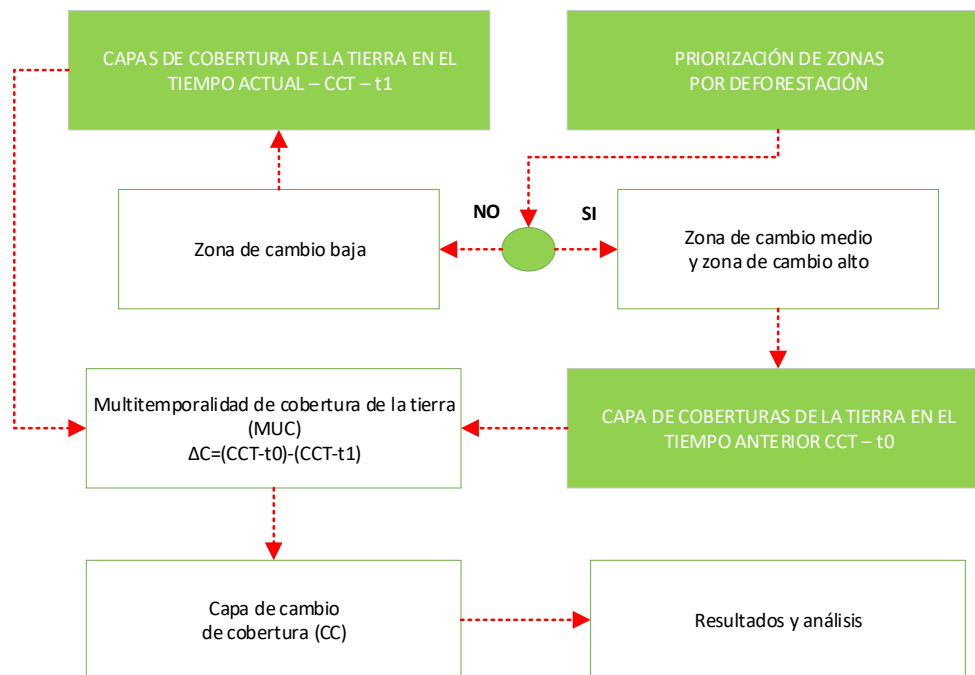


Figura 4-29. Metodología para la generación de la capa de cambio de cobertura de la tierra.

(SGC, 2017)

El diagrama comienza definiendo las zonas de priorización de acuerdo a las zonas de deforestación encontradas en los archivos IDEAM, se evalúa si existe cambio o no de

cobertura referente principalmente a zonas de bosque. Si existe cambio en la cobertura se pueden definir zonas de cambio medio y alto, que corresponden a zonas priorizadas. Si no se presenta deforestación el cambio es bajo, correspondiendo a una zona donde no se requiere del análisis multitemporal. La definición del grado de cambio (alto, medio o bajo) se define en la Tabla 4-11, a continuación.

Tabla 4-11. Clase de cambio por deforestación y priorización de las zonas para análisis multitemporal en la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.000.

	COBERTURA T1_IDEAM*	COBERTURA T2_IDEAM*	CLASE MAPA DE CAMBIO	GRADO DE CAMBIO_SGC	ACTIVIDAD
1	Bosque	Bosque	Bosque Estable	Bajo	Áreas de no implementación de análisis multitemporal
1	Bosque	No Bosque	Deforestación	Alto	Priorización de áreas para implementar análisis multitemporal de coberturas
1	Bosque	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Criterio experto
2	No Bosque	Bosque	Regeneración	Medio	Priorización de áreas para implementar análisis multitemporal de coberturas
2	No Bosque	No Bosque	No Bosque Estable	Medio	
2	No Bosque	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Criterio experto
3	Sin información	Bosque	Sin Información	Sin Información	Criterio experto
3	Sin información	No Bosque	Sin Información	Sin Información	Criterio experto
3	Sin información	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Criterio experto

(SGC, 2017)

La guía recomienda que para “zonas con grados de cambio bajo en la cobertura en más del 15% del área total se recomienda realizar el procedimiento de priorización de las zonas de deforestación obtenidas, sino se recomienda realizar el análisis de cambios de cobertura en toda el área de estudio” (SGC, 2017, p. 84)

La elaboración de los mapas de cobertura se basa en la manipulación y análisis de imágenes de sensores remotos que contienen información de la reflectancia de las diferentes coberturas de la tierra producto de las características de color y propiedades físicas de los cuerpos, por ejemplo, es diferente la reflectancia de un cultivo arbustivo, respecto a una zona de pastos o a una superficie de agua, lo que permite diferenciar las coberturas de la tierra.

La plataforma sugerida para la descarga de información de sensores remotos corresponde a Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), que es administrada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), esta plataforma web permite la consecución de imágenes de sensores remotos de cualquier parte de la tierra actualizadas. De acuerdo a lo descrito en la cartografía base se sugiere utilizar las imágenes satelitales gratuitas del programa espacial Sentinel-2. El programa cuenta con diversos sensores que registran el espectro electromagnético en diversas bandas espectrales descritas en la Tabla 4-12, en la que se presenta la longitud de onda, el ancho de banda y la resolución espacial de cada banda del espectro capturada por los sensores.

Tabla 4-12. Descripción de las bandas del programa satelital Sentinel – 2.

SENTINEL - 2 Resoluciones Espaciales y Radiométricas			
Número de banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8a	865	20	20
9	945	20	60
10	1375	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20
TCI*	RGB	Compuesto	10

European Space Agency (ESA)
 (“Sentinel-2 | The Long Term Archive”, 2018)

Para la selección de las imágenes a utilizar se requiere seleccionar las imágenes con el menor grado de nubosidad disponibles. Es muy común que no se encuentre una imagen sin ninguna nube, por lo que en ocasiones es requerido realizar mosaicos de imágenes de fechas cercanas que contengan información. Se recomienda que se realice la

interpretación de cada una de las imágenes por separado y luego realizar el mosaico, teniendo como base el mapa con mayor información.

Pre procesamiento de imágenes satelitales: En esta etapa se corrigen los errores en la toma y valores de la información, existen múltiples tipos de correcciones como por ejemplo geométrica, radiométrica y atmosférica. Se sugiere realizar la corrección atmosférica como mínimo. El programa propuesto corrige automáticamente el conjunto de bandas inicial y vuelve a crear y cargar un nuevo conjunto de bandas corregidas.

Como pre procesamiento también se recomienda realizar el recorte de las imágenes disponibles respecto a los límites del área de estudio con el fin de optimizar el costo computacional de los procedimientos en SIG.

Clasificación de coberturas con fines de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa: Se recomienda que la clasificación de las coberturas se haga de manera consiente y precisa, para ello es importante reconocer la zona de estudio en campo o al menos en Google Earth Pro, con el fin de identificar los cultivos que conformarán las coberturas del terreno y el uso del suelo en zonas fuertemente modificadas, es posible apoyarse en los conocimientos de los habitantes del lugar, quienes conocen de primera mano los tipos de cultivos y áreas con diferentes usos y su evolución en el tiempo.

Para la interpretación de la cobertura se combinan las bandas espectrales de la manera que resalten coberturas precisas de acuerdo a las propiedades reflectancia de los cuerpos que se observan a través del modelo de colores RGB. En la Tabla 4-13 se presentan algunas combinaciones de bandas recomendadas para interpretación de coberturas.

Tabla 4-13. Combinación de bandas sugeridas para la interpretación de coberturas.

NOMBRE	COMBINACIÓN BANDAS RGB
COLOR NATURAL	3,2,1
COLOR INFRAROJO (VEGETACIÓN)	7,3,2
COLOR FALSO (URBANO)	10,9,3
AGRICULTURA	9,7,1

NOMBRE	COMBINACIÓN BANDAS RGB
GEOLOGIA	10,3,1
PENETRACIÓN ATMOSFERICA	10,9,8
INFRAROJO DE BANDA CORTA (SWIR)	1,8,10
INFRAROJO DE BANDA CORTA (SWIR2)	1,9,10
VEGETACIÓN SALUDABLE	8,9,1

Elaboración propia

Las combinaciones del modelo RGB presentadas en la tabla corresponden a los valores de bandas reclasificados en el complemento SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) (Congedo, 2016) utilizado. El software define los centros los valores de las bandas de la imagen, sin tener en cuenta las bandas 1, 9 y 10 para Sentinel-2, debido a que son las bandas con menor resolución para el la clasificación teniendo un tamaño de pixel de 60 m.

Existen dos tipos procedimientos de clasificación de imágenes satelitales denominados: clasificación supervisada y clasificación no supervisada. La primera es realizada por un analista asistido por el software que identifica y asigna el tipo de cobertura cantidad de veces que sirven como entrenamiento para que el software clasifique posteriormente toda la imagen. La clasificación no supervisada es un proceso automático en el que el software define tipos de cobertura de acuerdo a los valores de longitudes de onda similares.

Selección de Regiones de Interés (ROI): La selección de las regiones de interés (ROI) corresponde al entrenamiento que se le da al software con el fin de que identifique las zonas de cobertura similar, es decir son las zonas que el observador identifica en una clasificación supervisada. Se recomienda trazar al menos 10 zonas ROI para cada una de las coberturas identificadas, pues así se garantizará que la clasificación final del mapa sea la más aproximada posible.

Post – procesamiento del mapa de cobertura de la tierra: Una vez realizada la clasificación supervisada del mapa de cobertura, se sugiere realizar la depuración del mapa de

cobertura obtenido mediante la agrupación de píxeles utilizando el filtro de clasificación por tamizado.

4.4.4 N Factores Condicionantes Adicionales

En la propuesta metodológica no se limita la cantidad de factores a utilizar para los análisis de susceptibilidad, pues no es posible asegurar que solamente los factores propuestos modelaran el comportamiento de laderas inestables de la cuenca. Por otra parte, un análisis de muchos factores tampoco garantiza una representación ideal del comportamiento de las laderas, incluso muchas variables pueden generar ruido en los análisis.

Los factores condicionantes adicionales deberán ser seleccionados mediante criterio experto y de acuerdo a la calidad de información para la escala definida y disponible. Es posible que se puede construir información adicional como mapas de geomorfología, de parámetros de materiales, de espesores, de clasificación de suelos, de distancias a fallas, relieve, rugosidad, entre otros que podrían describir de mejor manera los materiales presentes, así como también mapas que describan la afectación de las laderas producida por efecto del uso del terreno, como por mapas con la ubicación de zonas de vertimiento aguas concentradas y sobrecargas.

El método estadístico bivariado con el que realizan los análisis de susceptibilidad y amenaza tiene la ventaja de correlacionar cada una de los factores condicionantes con el inventario de procesos de remoción en masa, permitiendo evaluar cada una de los factores condicionantes individualmente, siendo la etapa que permite seleccionar los factores que mejor representan las condiciones de inestabilidad de la cuenca.

4.5 Análisis de susceptibilidad del terreno a procesos de inestabilidad

Para la evaluación de la susceptibilidad del terreno ante procesos de remoción en masa se determina el grado de representación de cada uno de los factores condicionantes,

utilizando el método estadístico bivariado de pesos de evidencia (WofE). En un análisis de este tipo se compara una variable independiente (factores condicionantes) con otra variable dependiente (inventario de deslizamientos) en términos de probabilidad de ocurrencia. A continuación, se describe en detalle el método utilizado, el cual se asocia a un modelo de estabilidad del terreno a escala 1:25.000.

4.5.1 Modelo de estabilidad de laderas mediante método de pesos de evidencia (WofE)

El modelo se resume en comparar la superposición de la variable dependiente definida como las áreas del inventario de procesos de remoción en masa con cada uno de los factores condicionantes definidos anteriormente. Cada factor condicionante está dividido en clases o categorías que se interceptan o no con el inventario de procesos de remoción en masa. En la intersección se obtienen zonas de presencia y ausencia de inestabilidad con las que se determina la probabilidad previa y posterior de la representatividad o peso de cada clase del factor condicionante para zonas inestables.

Lo anterior se denomina en el presente trabajo como el modelo de estabilidad del terreno a escala 1:25.000, pues se comparan condiciones precisas en la ocurrencia de zonas inestables y se asocian a futuras áreas susceptibles a movimientos en masa de acuerdo a la presencia o no de dichos factores condicionantes.

Las posibles relaciones de presencia o ausencia de zonas inestables entre el inventario y un factor condicionante se presentan en la Figura 4-30, en la que se define un área de estudio que para este caso es la cuenca, la presencia y ausencia del factor condicionante y las zonas inestables mediante la superposición de las capas.

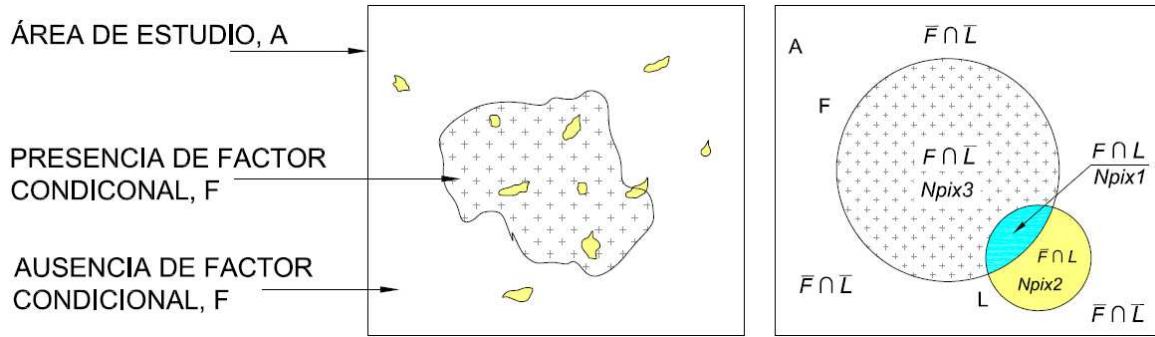


Figura 4-30. En la parte izquierda se presenta la relación general entre el inventario de deslizamientos y un factor condicionante. En la derecha se presenta en el diagrama de Venn en el que se resume la relación de traslapo entre el factor condicionante y el inventario.

Adaptación propia

La ocurrencia de una zona inestable dada la presencia de un factor condicionante, puede ser expresada por la probabilidad condicional (Dahal et al., 2008) que se puede definir como la presencia de una zona inestable (L) dada la presencia de un factor condicionante (F), de acuerdo a la ecuación:

$$P\{L|F\} = \frac{P\{L \cap F\}}{P\{F\}}$$

Donde $P\{L \cap F\}$ es igual al área ocupada entre L y F , es decir la superposición entre ambas, que en términos de áreas se puede expresar como sigue:

$$P\{L \cap F\} = \frac{N\{L \cap F\}}{N\{A\}}$$

Donde $N\{L \cap F\}$ corresponde al área traslapada y $N\{A\}$ corresponde al área total de análisis. La probabilidad previa de la ocurrencia de movimientos en masa puede ser expresada a partir de la distribución de factor condicionante en el área de estudio, lo que se puede expresar como:

$$P\{F\} = \frac{N\{F\}}{N\{A\}}$$

Donde $P\{F\}$ corresponde a la probabilidad de factor condicionante y $N\{F\}$ es el área de dicho factor. Reemplazando las dos ecuaciones anteriores en la primera se obtiene la probabilidad de ocurrencia de una zona inestable dado un factor condicional en términos del área traslapada y el área total del factor, como sigue:

$$P\{L|F\} = \frac{N\{L \cap F\}}{N\{F\}}$$

Con el fin de obtener una expresión que relacione la probabilidad posterior de las zonas inestables (L) en términos de la probabilidad previa por un factor multiplicador, se utiliza la probabilidad condicional de F dada la presencia de la zona inestable (L), de acuerdo a la siguiente definición:

$$P\{F|L\} = \frac{P\{F \cap L\}}{P\{L\}}$$

Como $P\{F \cap L\}$ es igual a $P\{L \cap F\}$, se pueden combinar las ecuaciones anteriores encontrando la probabilidad posterior de las zonas inestables dada la presencia del factor condicional, que es igual a la probabilidad previa de zonas inestables $P\{L\}$ por un factor multiplicador, como se muestra a continuación.

$$P\{L|F\} = P\{L\} \frac{P\{F|L\}}{P\{F\}}$$

Una expresión similar puede ser obtenida para definir la probabilidad posterior de la ocurrencia de zonas inestables debida a la ausencia del factor condicionante como se muestra:

$$P\{L|\bar{F}\} = P\{L\} \frac{P\{\bar{F}|L\}}{P\{\bar{F}\}}$$

Donde P es la probabilidad, \bar{F} corresponde a la ausencia del factor condicionante y L hace referencia a la presencia de zonas inestables (Dahal et al., 2008). La formulación matemática completa del cálculo de pesos de evidencia es descrita por Bonham-Carter (1984).

De acuerdo a lo anterior, teniendo en cuenta la presencia y ausencia del factor condicionante, se define un peso positivo y negativo de la influencia de cada factor condicionante en la determinación de zonas inestables, como se describe a continuación.

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{F | L\}}{P\{F | \bar{L}\}} \quad W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{F} | L\}}{P\{\bar{F} | \bar{L}\}}$$

Donde W_i^+ es un peso de evidencia positivo del factor condicionante evaluado dada la presencia del factor en las zonas inestables, mientras que W_i^- es un peso de evidencia negativo dada la ausencia del mismo e indica nivel de correlación negativo (Dahal et al., 2008).

El método anterior ha sido ampliamente implementado usando software de SIG, usando la unidad de pixel para el análisis de superposición entre cada factor condicionante y las zonas inestables del inventario (Van Westen, 1993; Terlien, Westen, & Asch, 1995; van Westen et al., 2008, Dahal et al., 2008). En la Figura 4-31, se presenta una explicación de la representación del método de pesos de evidencia en términos de pixeles.

		F: Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L: Zonas inestables	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad F	Área total sin unidad F	Área total del mapa

Figura 4-31. Representación gráfica de las posibles combinaciones entre un factor condicionante y las zonas inestables.

Adaptación propia - (SGC, 2017)

De la figura anterior N_{pix} corresponde al número de píxeles de acuerdo a la superposición. Los pesos de evidencia de cada clase de factor condicionante en términos de píxeles se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$W_i^+ = \ln \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \quad W_i^- = \ln \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}}$$

Para definir el grado de representatividad de cada la clase del factor condicionante, se calcula el peso final mediante la resta del peso de evidencia positivo y el negativo, definido como el peso de contraste que refleja la asociación espacial general entre las dos variables, se obtiene a partir de:

$$W_f = W_i^+ - W_i^-$$

Un valor positivo que se aleje de cero, corresponde a un alto valor de significancia de representación del factor condicionante evaluado en términos de la posible incidencia en la ocurrencia de zonas inestables.

4.5.2 Combinación de variables que representan inestabilidad

La combinación las variables hace referencia al estudio conjunto de determinadas variables para el cálculo de susceptibilidad. Cada combinación se define como un Índice de Susceptibilidad de Deslizamientos (LSI) que se obtiene de la suma de los pesos finales (W_f) de cada factor condicionante de acuerdo a una combinación de variables definida.

Para la selección de las combinaciones que representen el mayor grado de representación de la inestabilidad se recomienda hacer un análisis inicial de los pesos finales de cada una de las variables individualmente. La combinación de las variables con mayores pesos podría llegar a general un alto Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI). A continuación, se presenta la obtención de un LSI.

$$LSI = W_f Pendiente + W_f Curvatura + W_f UGS + W_f Cambio Cobertura + W_f Uso del Suelo \\ + \dots + W_{fi} Variable_i$$

Para la selección de las variables a combinar se debe tener en cuenta la representatividad de la información de cada una y la fuente de información. Son muy diferentes los factores condicionantes temáticos en los que se requiere una escala de levantamiento adecuado y detallado, mientras que los factores calculados a partir del modelo de elevación digital (DEM) como los de morfometría (aspecto, pendiente y curvatura) cuentan con una distribución y detalle mayores por debido a la información detallada con que se obtienen.

La interpretación y comparación del ajuste de los diferentes índices de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) se realiza mediante la construcción de curvas de éxito que relacionan las clases percentiles acumuladas de cada combinación. La curva se construye mediante la relación del porcentaje acumulado de píxeles del área de estudio en las clases de susceptibilidad (abscisas), respecto al porcentaje acumulado de píxeles de movimientos en masa en las clases de susceptibilidad. Se considera aceptable un valor de área bajo la curva de éxito mayor a 70% (SGC, 2017).

4.5.3 Zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa

Para la construcción del mapa de susceptibilidad final es necesario definir las zonas de susceptibilidad alta, media y baja. Para ello se utilizan las curvas de éxito en las que se definen porcentajes de las zonas inestables acumuladas y se relacionan con una descripción de susceptibilidad así:

El 75% del área acumulada de píxeles de movimiento en masa en la curva de éxito se define como susceptibilidad alta. La susceptibilidad media corresponde hasta el 98% de los píxeles acumulados de los movimientos en masa y de ahí en adelante corresponde a la susceptibilidad baja. En la Figura 4-32 se presenta un ejemplo de clasificación de susceptibilidad a partir de la curva de éxito.

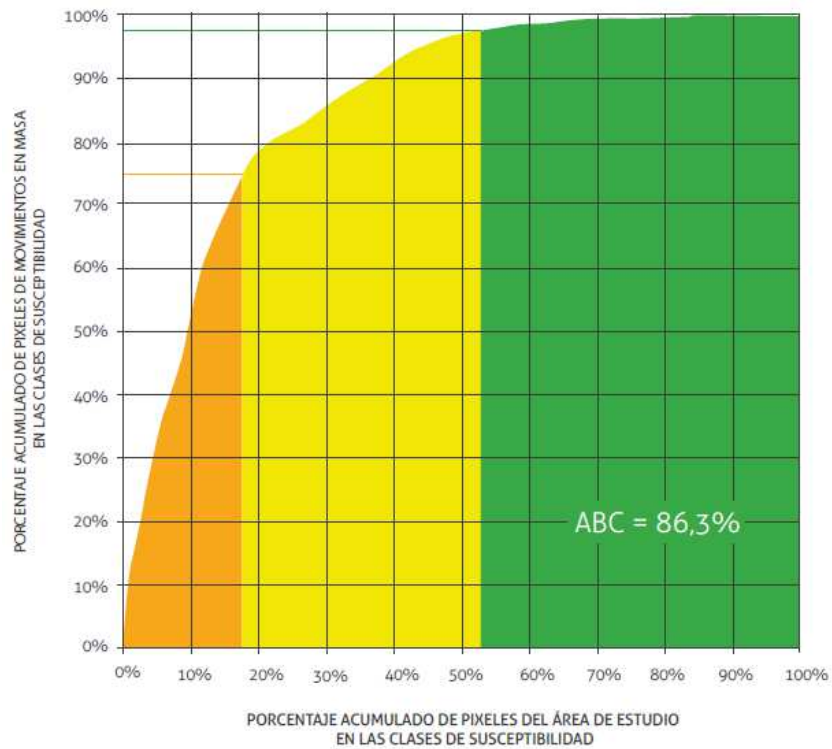


Figura 4-32. Ejemplo de categorización de la curva de éxito, para la susceptibilidad alta, media y baja.

SGC (2017)

4.5.4 Mapa de densidad de deslizamientos

El mapa de densidad de deslizamientos (Isopleths) se propone como variable de comparación y validación para la selección de los Índices de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) adecuados para la cuenca. En la Figura 4-33, se presenta un esquema general para la construcción del mapa de Isopleths (DeGRAFF, 1985; DeGraff & Canuti, 1988).

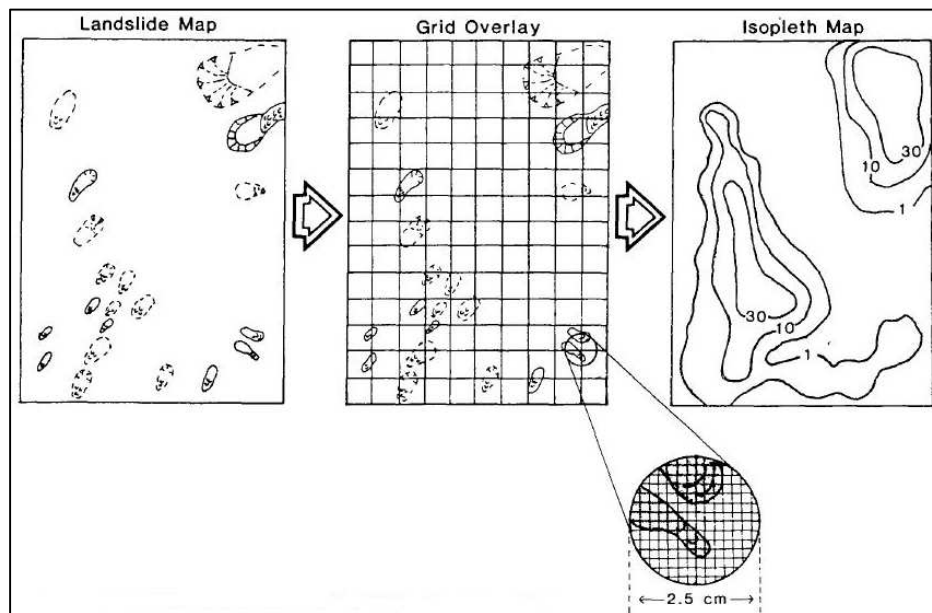


Figura 4-33. Procedimiento general para la elaboración de mapas de densidad de deslizamiento.

(DeGraff & Canuti, 1988)

Para cada punto de intersección de la malla se obtiene un valor de cantidad de área deslizada, de acuerdo a un círculo con centro en la intersección y de diámetro inferior al de la separación de la cuadrícula. Una vez obtenida el área deslizada, se interpola los puntos de toda la malla para obtener el mapa de densidad de deslizamientos.

La ventaja de la utilización del mapa de densidad de deslizamientos es que la variable inestabilidad del terreno se vuelve continua en el área de análisis pudiendo brindar una idea del comportamiento general de la zona y pudiendo servir como modelo de calibración de los mapas de susceptibilidad obtenidos mediante pesos de evidencia.

No es clara la proporción que debe tener el radio de la circunferencia respecto a la malla de análisis y a la misma escala de trabajo. En la Figura 4-34 se presenta un ejemplo de diferentes valores de espaciamiento de la malla de puntos y de radios. En la presente metodología se propone utilizar el 75% del valor de separación de la malla como radio, permitiendo un traslapeo entre los círculos que permite compartir información zonas inestables entre puntos de la malla.

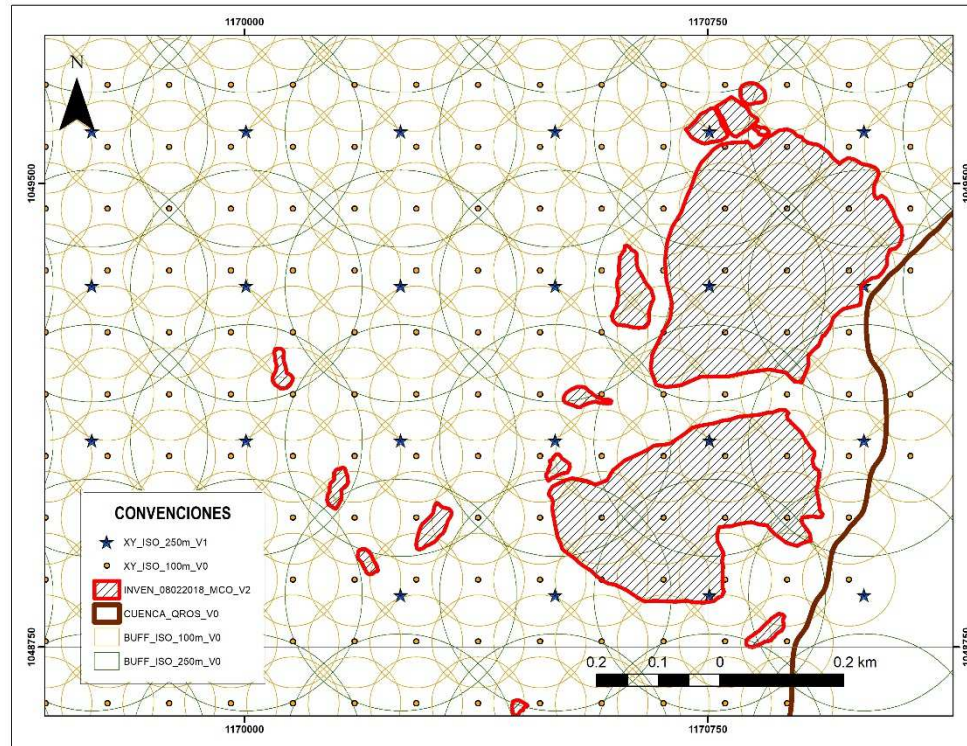


Figura 4-34. Comparación de espaciamientos de mallas y diámetros de circunferencias
Elaboración propia

De la figura se pueden observar circunferencias de diferentes diámetros. Las más grandes tienen 250 m de diámetro, identificadas por su centro representado con estrellas azules. Las circunferencias más pequeñas tienen un diámetro de 100 m y sus centros corresponden a puntos. De acuerdo a lo anterior, se puede observar que mallas muy pequeñas no son recomendadas pues, entre más pequeña sea la malla, se ajustará a los polígonos de las zonas inestables. Se propone utilizar circunferencias de un diámetro proporcional a la escala de trabajo. Para la escala 1:25000, se propone utilizar las circunferencias de 250 m de diámetro.

Para la obtención del mapa de isopleths se utiliza algún método de interpolación entre las intercepciones de la malla. Los métodos de interpolación sugeridos son: Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW) y Kriging. Una vez obtenido el mapa, se requiere definir la clasificación de los valores en rangos que permitan identificar de mejor manera las zonas

potencialmente inestables. Para la clasificación propone utilizar una clasificación mediante a percentiles, permitiendo definir el mapa final de densidad de deslizamientos.

4.6 Definición del factor detonante de inestabilidad: Precipitación

En el presente trabajo como factor detonante de los procesos de inestabilidad se presenta una aproximación a la influencia de la precipitación en las laderas. Aplicando el concepto de espacialización y de Déficit de Saturación del Suelo (SMD o Ds) del modelo hidrológico TOPMODEL, el cual tiene en cuenta la influencia del flujo desde aguas arriba y no solo en que se precipita sobre un área determinada.

4.6.1 TOPMODEL

Es un modelo hidrológico tipo lluvia – escorrentía, propuesto por Beven y Kirkby (1979), desarrollado en cuencas del Reino Unido. El modelo tiene como ventaja la cuantificación de la influencia de la topografía en los procesos hidrológicos dentro de una cuenca, de ahí su nombre (Beven & Kirkby, 1979) (Beven, Kirkby, Schofield, & Tagg, 1984). Es decir que el modelo permite un análisis de las áreas aferentes o contributivas para cada una de las zonas específicas de la cuenca o píxeles.

La conceptualización gráfica del modelo TOPMODEL se presenta en la Figura 4-35, en la que se identifican las variables de entrada al modelo y la dirección en que éstas intervienen en el ciclo hidrológico.

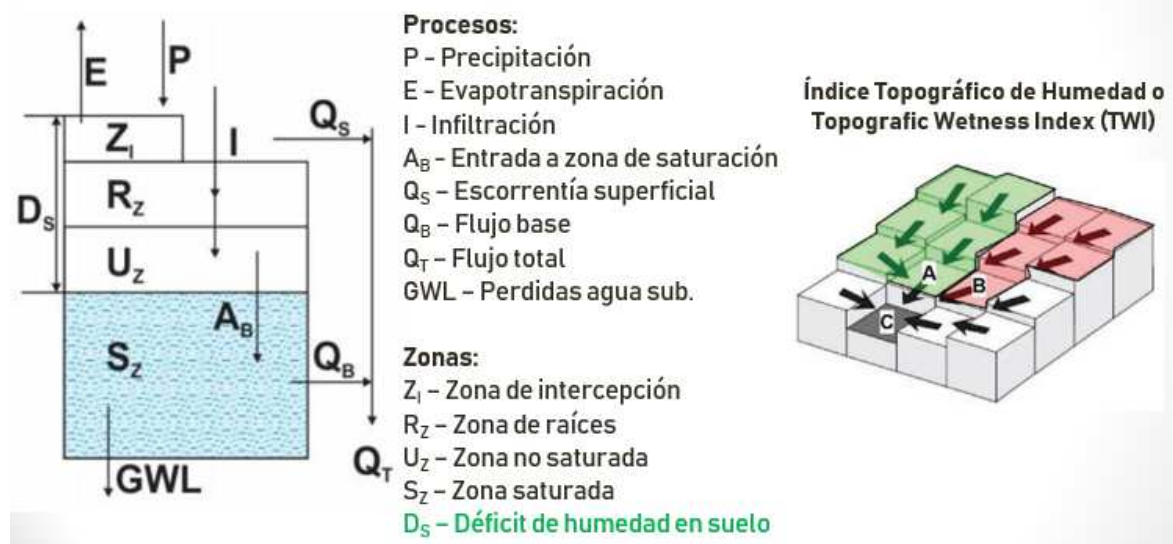


Figura 4-35. Conceptualización vertical del modelo hidrológico TOPMODEL (Izq) y descripción gráfica de la influencia topográfica en el aporte de flujo desde agua arriba (Dch).

(“TOPMODEL - Caja de Herramientas de Hidrología para POMCAS”, 2018)

De la figura de conceptualización del modelo se puede observar que la variable de entrada principal es la precipitación (P), que al caer entra en contacto con la zona de intercepción (Z_I), que es la superficie del terreno, en donde ocurre la evapotranspiración (E) que dirige el agua interceptada otra vez a la atmósfera. La precipitación que no es interceptada se divide en flujo de infiltración (I) y en flujo de escorrentía superficial (Q_S). El agua que se infiltra (I), atraviesa la zona de raíces (R_Z) y la zona de suelo no saturada (U_Z), hasta llegar a la zona saturada (S_Z) en la que una porción se convierte en flujo base (Q_B) y otra se pierde en profundidad (GWL), debido a la estructura de los materiales. La zona de intercepción (Z_I) junto con la zona de raíces (R_Z) y la zona no saturada (U_Z) conforman el déficit de humedad del suelo (D_S). Finalmente, el caudal de escorrentía superficial (Q_S) y flujo base (Q_B) forman el caudal total (Q_T), siendo el que se observa y mide en los cuerpos de agua.

Como entrada al modelo TOPMODEL se requiere de la información correspondiente al Índice Topográfico de Humedad (TWI) e información climatológica compuesta por series históricas de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal.

El Índice Topográfico de Humedad o Topographic Wetness Index en inglés (TWI), relaciona el área aferente que aporta caudal y la pendiente del área de estudio y se define como:

$$TWI = \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$$

En donde a corresponde a el área contributiva aguas arriba del área de análisis y β corresponde a la pendiente de dicha zona (píxel).

Uno de los resultados del modelo hidrológico se define el Déficit de Humedad del Suelo (Ds) o Soil Moisture Deficit (SMD), que se puede entender como la diferencia entre la cantidad de agua que el suelo puede almacenar y la cantidad de agua actual en el suelo, esta definición se conoce como capacidad de campo. En el presente trabajo se asocia el SMD con el Nivel de Aguas Freáticas (NAF), definido como la posición de la lámina de agua. El valor de SMD está dado por las ecuaciones que se describen a continuación.

$$SMD = -m * \ln\left(\frac{R}{T_{max}}\right) - m * \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$$

$$\overline{SMD} = -m * \ln\left(\frac{\bar{R}}{T_{max}}\right) - m * \lambda$$

$$SMD = \overline{SMD} + m * \left(\lambda - \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)\right)$$

En donde SMD corresponde al Déficit de Humedad del Suelo, m es un parámetro de calibración del modelo, R corresponde a la recarga o precipitación, T_{max} es la transmisividad máxima del suelo, a es el área tributaria aferente al sitio de análisis, β define la pendiente del terreno y λ corresponde al promedio del TWI. La transmisividad máxima del suelo se define como la conductividad hidráulica (K) por un ancho unitario de suelo de un espesor determinado.

La aplicación y utilización del modelo se realiza en el software SAGA GIS, en el cual se encuentra programado TOPMODEL (Conrad et al., 2015). Se recomienda la calibración y

validación del modelo hidrológico de acuerdo a metodologías ampliamente conocidas como: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), GLUE, PEST o Simulaciones de Monte Carlo. Para su aplicación se recomienda los softwares R o SAGA, que los traen incorporados algunos. Se debe tener en cuenta que la calibración y validación del modelo depende primordialmente de la disponibilidad de registros de información adecuados y temporalmente significantes, así como de la disponibilidad de recursos para trabajos de campo de validación.

Existen muchas posibilidades de aplicación y análisis del modelo descrito debido a las mismas posibilidades de involucrar características de los materiales, sin embargo, en el presente trabajo se busca presentar las consideraciones iniciales de la aplicación del modelo, es decir teniendo en cuenta la precipitación y transmisividad máxima como valores constantes, buscando entender la influencia de la condición topográfica propiamente dicha, obtenida del DEM.

Una vez obtenidos los mapas de TWI y SMD productos del modelo hidrológico TOPMODEL, son evaluados de acuerdo al método estadístico bivariado de pesos de evidencia (WofE) descrito anteriormente. Buscando una correlación entre las profundidades del nivel freático asociadas al Déficit de Humedad del Suelo (SMD) y al Índice Topográfico de Humedad (TWI) con las áreas inestables del inventario de deslizamientos.

4.7 Zonificación y Análisis de amenaza por procesos de remoción en masa

Para la zonificación de la amenaza se propone la combinación de los pesos de evidencia obtenidos en los análisis de susceptibilidad con los del análisis de la respuesta hidrológica, con el fin de obtener un Índice de Amenaza por Deslizamientos (LHI) de acuerdo a los propuesto por Dahal et al. (2008). En donde se suman todos los pesos de evidencia obtenidos (Dahal et al., 2008).

De manera similar a lo propuesto para los análisis de susceptibilidad, la condición de amenaza alta, media o baja se define de acuerdo la construcción de curvas de éxito, que determinan la bondad de representación de los factores combinados.

Los rangos de la curva de éxito propuestos que definen las categorías de amenaza son: La categoría de amenaza alta es la correspondiente al 70% del porcentaje acumulado todos los movimientos en masa para cada LHI, seguida de la categoría de amenaza media de hasta máximo el 25% del área acumulada de los movimientos en masa y finalmente la categoría baja con un porcentaje menor del 5% del área acumulada de movimientos en masa.

5. Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario a escala 1:25.000

A continuación, se presenta la aplicación de la metodología propuesta en el presente trabajo. El sitio de estudio corresponde a la cuenca de la quebrada El Rosario, ubicada en la zona rural del municipio de Manizales, hacia el costado occidental de la ciudad.

La importancia de esta cuenca radica en que en ella se proyecta la vía principal de acceso a la ciudad de Manizales con el occidente, además, se asientan barrios como la Francia, corregimientos como El Arenillo y Morrogacho edificios vitales como el Hospital Santa Sofía y una amplia zona industrial que proporciona una relevancia económica a la ciudad. La cuenca es considerada una zona de expansión urbana importante.

Hidrográficamente la cuenca de la quebrada El Rosario es una corriente tributaria del río Chinchiná, que a su vez desemboca en el río Cauca. Tiene un área aproximada de 4000 Ha, una temperatura promedio de 19.08 °C de acuerdo al registro promedio de la estación Alcázares, una altura mínima de 1145 m.s.n.m en su desembocadura al río Chinchiná y una altura máxima de 2220 m.s.n.m en la zona del monumento a los colonizadores de la ciudad. En la Figura 5-1 se presenta la localización general de la cuenca.

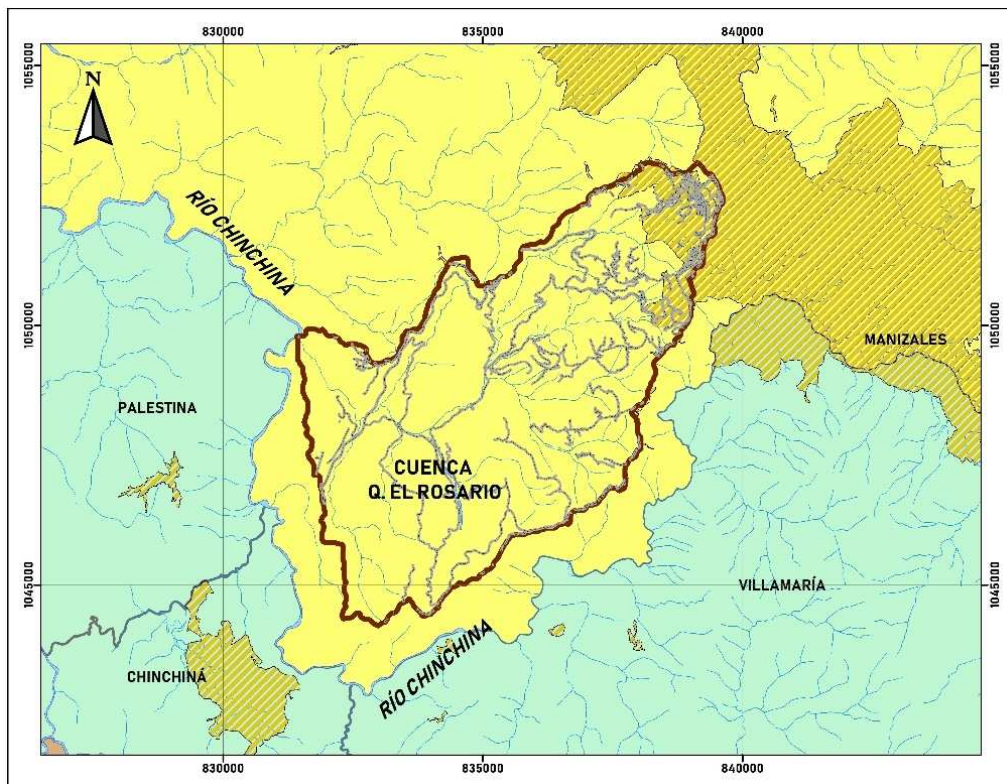


Figura 5-1. Localización de la cuenca de la quebrada El Rosario

5.1 Obtención de información antecedente y cartografía base.

Para la determinación de los factores condicionantes y detonantes de inestabilidad para la cuenca se utilizaron diferentes fuentes de información, referentes a estudios antecedentes y datos de adquisición libre.

La principal fuente de información son los estudios del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) del río Chinchiná, realizados por el Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. Estos estudios son base como fuente de información debido a la similar escala a la que se proponen la metodología 1:25.000. La información que se utilizó del POMCA fue los mapas temáticos de geología, cobertura del terreno del año 2010 y mapa agrológico del suelo como factor condicionante N.

Para los factores condicionantes de morfometría: aspecto, pendiente y curvatura, se utilizó el modelo de elevación digital (DEM), del proyecto satelital ALOS PALSAR, de una resolución de 12.5 x 12.5 m, fecha de adquisición de la información del 20 de agosto de 2010, la imagen se encuentra en el *Path 148* y en el *Frame 80*, la referencia de la imagen es ALPSRP243470080. El sistema de coordenadas utilizado para el desarrollo de todos los análisis corresponde al sistema Magna Colombia Oeste.

5.2 Inventario de procesos de remoción en masa para la cuenca

El levantamiento del inventario se hizo de acuerdo a lo propuesto en la metodología de análisis visual de imágenes y la utilización de la herramienta Google Earth Pro para generación de la información. El levantamiento de información se llevó a cabo durante varios meses, apoyado por el director del presente trabajo en la observación y análisis de imágenes.

Como resultado para la cuenca de la quebrada El Rosario se identificaron 142 procesos de remoción en masa de acuerdo a las tipologías que se presentan en la Tabla 5-1, a continuación.

Tabla 5-1. Resumen del inventario de deslizamientos por tipo de deslizamiento para la cuenca de la quebrada El Rosario.

ID	TIPO PROCESO REMOCIÓN	CANTIDAD	% CANTIDAD	ÁREA (m ²)	% ÁREA
1	FLUJO DE TIERRAS	13	9%	10725	2%
2	PROCESOS COMPLEJOS	7	5%	40159	7%
3	DESLIZAMIENTO TRANSLACIONAL	78	55%	55112	10%
4	DESLIZAMIENTO ROTACIONAL	25	18%	76129	13%
5	DEFORMACIONES DEL TERRENO	12	8%	148955	26%
6	EROSIÓN HIDRICA CONCENTRADA	7	5%	233392	41%
TOTAL		142	-	564472.0	-

El levantamiento del inventario de movimientos en masa completo se presenta en el Anexo A, en el que se presentan los indicadores identificados visualmente y las coordenadas geográficas de cada registro.

De la tabla anterior se puede concluir que, aunque la mayoría de los procesos son de tipo translacional solamente corresponden a un 11% del área inestable identificada para toda la cuenca. Los procesos de erosión hídrica concentrada son lo de mayor extensión con un 41% del área inestable levantada. La explicación de la importante proporción de este tipo de procesos puede ser debida a la cárcava de El Tablazo, siendo un proceso erosivo de importante magnitud ubicado en la parte alta de la cuenca. En la Figura 5-2 se presenta el inventario de procesos de remoción en masa para la cuenca de estudio.

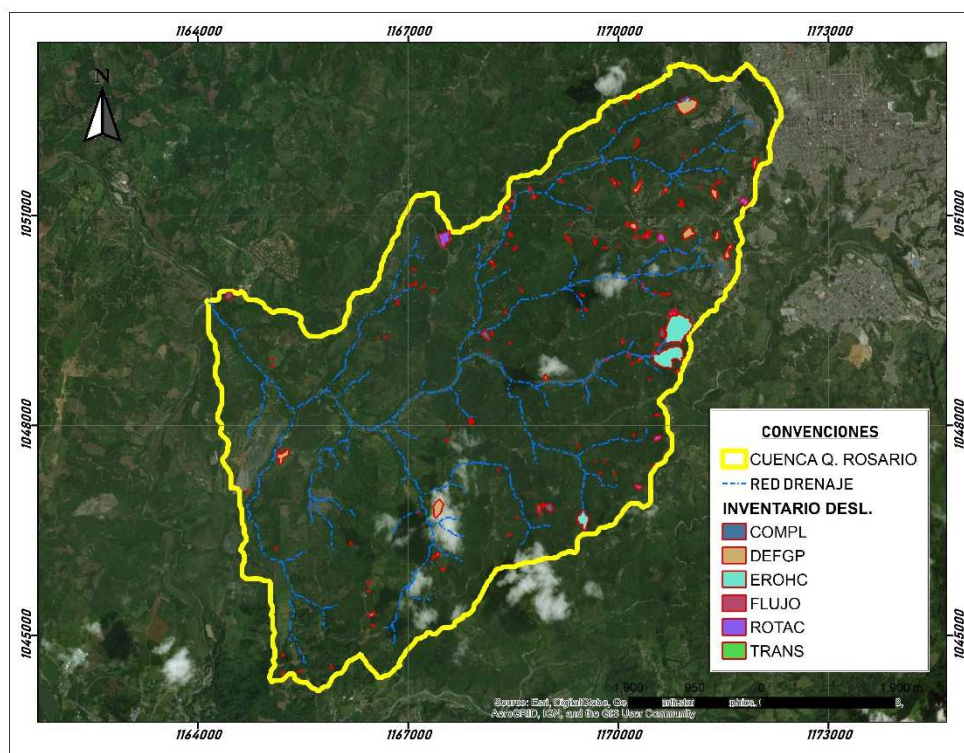


Figura 5-2. Inventario de movimientos en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario.

Del inventario se logra identificar que en la cuenca predominan los deslizamientos traslacionales de poca profundidad y de pequeña magnitud, sin embargo, también se aprecia la importante morfodinámica de la zona, por la variedad de movimientos identificados que corresponden al 1.45% de toda el área de la cuenca.

Aunque se realizó un análisis de información antecedente de movimientos en masa en diferentes fuentes de información como: Corpocaldas, la Alcaldía de Manizales, el SIMMA del Servicio Geológico Colombiano, DesInventar y en algunos medios de comunicación, la mayoría de eventos son posibles identificarlos en la observación de imágenes y otros no cuentan con la información suficiente para incluirlos en el inventario. Debido a lo anterior únicamente se utilizó la información levantada con la metodología propuesta.

5.3 Visita de reconocimiento de campo

Para la validación de la información procesada y generada en oficina, se realizó una visita de campo de dos días en el mes de abril de 2018, cuyos objetivos fueron:

- Validar el inventario de deslizamientos levantado en oficina.
- Aplicar en un caso real la aplicación móvil LandSlide Collector V0.0.
- Reconocer y entender las características de cobertura y uso de suelo en la cuenca.
- Observar características de los materiales presentes.
- Validar los mapas de aspecto, pendiente y curvatura obtenidos del DEM.

En la Figura 5-3, se presenta una vista general desde la parte alta de la cuenca, en el medio de la fotografía se observa el viaducto La Estampilla que hace parte del importante corredor vial que atraviesa la zona. En la fotografía también se puede observar la variedad de cultivos predominantemente café, plátano y cítricos que se extienden sobre las laderas pronunciadas de la cuenca.



Figura 5-3. Vista general de la cuenca, viaducto La Estampilla, cultivos de café, plátano y cultivos de cítricos.

En la visita se validaron algunos de los registros del inventario a los que se podría acceder fácilmente, pues muchas de las zonas identificadas hacen parte de predios privados. Para la validación del inventario de deslizamientos se utilizó la herramienta Landslide Collector v0.0.

De acuerdo a la labor de campo realizada, la aplicación permite un adecuado registro y almacenamiento en campo de las características de los procesos. La funcionalidad de la aplicación y su precisión se validaron con mediciones con cinta en el terreno. Como resultado se obtuvieron comentarios al diseño de la aplicación para ser mejorada en posibles versiones posteriores.

Los materiales presentes generalmente corresponden a depósitos de origen volcánico de espesor variable, se pueden observar principalmente limos arcillosos y arenosos con espesores de varios metros. Los suelos encontrados también son producto de la

meteorización de las formaciones presentes, pudiendo observar una dirección y buzamiento predominantes hacia el occidente.

La morfometría se verificó mediante el uso de navegador GPS y de acuerdo al método observacional. Se observaron los límites de las laderas asociados al aspecto, además de la pendiente y la curvatura que se identificaban de acuerdo a la perspectiva en el terreno. Como resultado de esta validación se comprobó la utilidad del mapa de aspecto y la necesidad de verificar detalladamente la curvatura de las laderas en campo.

En la visita también se identificaron obras de contención como muros en gavión y pantallas con anclajes activos, generalmente combinados con un sistema de manejo de aguas. En la Figura 5-4 que puede ver un ejemplo de las obras de contención encontradas en la visita de reconocimiento.



Figura 5-4. Obras de contención en algunos sitios de la cuenca.

Se contó con el apoyo de la ingeniera Lizeth Abril en la recolección de información, en la comprobación de la funcionalidad de la aplicación móvil LandSlide Collector V0.0, entre otros objetivos de la visita.

En el Anexo B se presenta una descripción sistematizada de lo observado en la visita de reconocimiento de campo junto con algunos formatos del inventario de movimientos en masa completados con la aplicación móvil.

5.4 Factores condicionantes de inestabilidad para la cuenca de estudio

A continuación, se presentan los factores condicionantes obtenidos para la cuenca de la quebrada El Rosario.

5.4.1 Morfometría

De acuerdo a lo descrito en este trabajo, el factor morfometría se divide en tres factores definidos como: aspecto, pendiente y curvatura, obtenidas del DEM y presentadas a continuación.

- **ASPECTO**

El mapa de aspecto de la cuenca se presenta en la Figura 5-5, en los que se diferencia por colores cada una de las direcciones de las laderas. El resumen del mapa de aspecto para la cuenca se presenta en Tabla 5-2, en donde se observan direcciones de ladera predominantes al nor-oeste.

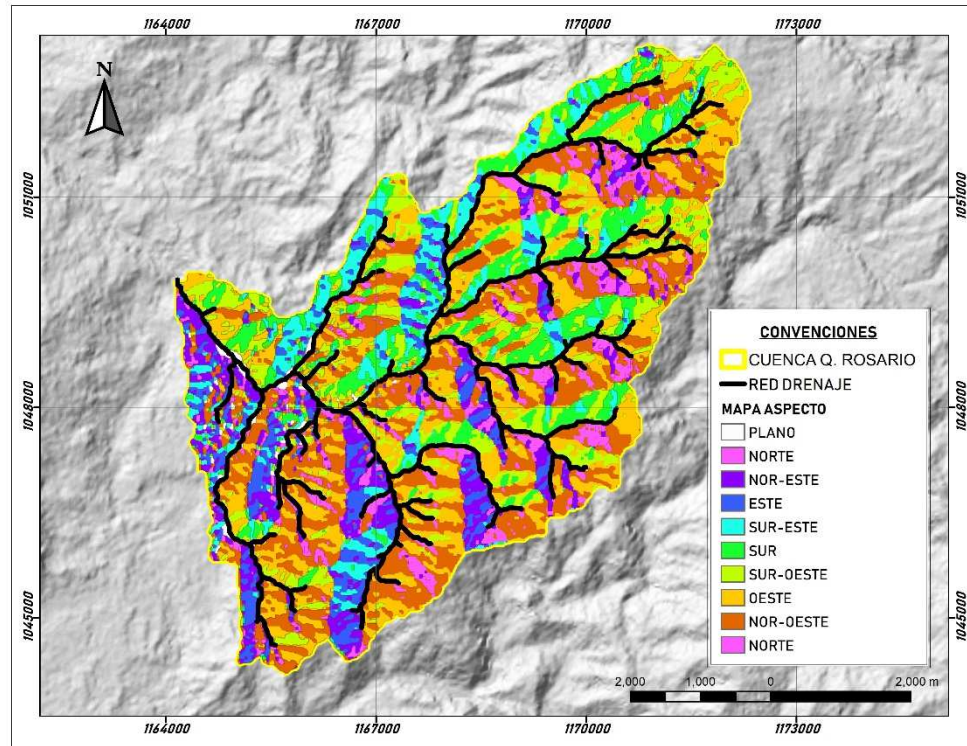


Figura 5-5. Mapa de aspecto clasificado para la cuenca en estudio.

Tabla 5-2. Resumen del aspecto para la cuenca de la quebrada El Rosario.

ID	ASPECTO	CANTIDAD	%CANTIDAD	ÁREA (Ha)	% ÁREA
1	PLANO	62	1.82%	35.9	0.93%
2	NORTE	548	16.05%	280.6	7.24%
3	NOR-ESTE	354	10.37%	322.4	8.32%
4	ESTE	252	7.38%	265.7	6.85%
5	SUR-ESTE	272	7.97%	320.5	8.27%
6	SUR	336	9.84%	429.5	11.08%
7	SUR-OESTE	522	15.29%	509.0	13.13%
8	OESTE	548	16.05%	815.8	21.04%
9	NOR-OESTE	520	15.23%	897.8	23.16%
TOTAL		3414	100%	3878.0	100%

A partir de los polígonos del inventario de movimientos en masa, se lleva a cabo el análisis de pesos de evidencia (WofE) de las clases del factor. En la Tabla 5-3 se presenta el resultado del cálculo de pesos de evidencia para la variable Aspecto.

Tabla 5-3. Análisis de pesos de evidencia para la variable Aspecto, de acuerdo a las clases propuestas.

ID	ASPECTO	MOV.	%MOV.	CLASE	%CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
1	OESTE	1415	34.7%	52325	21.1%	1415	2668	50910	193267	0.508	-0.192	0.700
2	SUR-OESTE	767	18.8%	31993	12.9%	767	3316	31226	212951	0.385	-0.071	0.456
3	NOR-OESTE	1136	27.8%	55164	22.2%	1136	2947	54028	190149	0.229	-0.076	0.305
4	PLANO	0	0.0%	2966	1.2%	0	4083	2966	241211	0.000	0.012	-0.012
5	SUR	300	7.3%	28065	11.3%	300	3783	27765	216412	-0.437	0.044	-0.481
6	NORTE	159	3.9%	18636	7.5%	159	3924	18477	225700	-0.664	0.039	-0.703
7	NOR-ESTE	135	3.3%	18881	7.6%	135	3948	18746	225431	-0.842	0.046	-0.889
8	SUR-ESTE	103	2.5%	20306	8.2%	103	3980	20203	223974	-1.188	0.061	-1.249
9	ESTE	68	1.7%	19550	7.9%	68	4015	19482	224695	-1.567	0.066	-1.633

De la tabla se puede inferir que la mayoría de movimientos en masa se presentan en las laderas con dirección al oeste con un 34.7% del total del área deslizada. Aunque la dirección preferente de las laderas es nor-oeste, los procesos del inventario ocurren preferentemente en las laderas con direcciones oeste y sur-oeste, de acuerdo al peso final de evidencia encontrado.

▪ PENDIENTE

El mapa de pendientes clasificado se presenta en la Figura 5-6, a continuación.

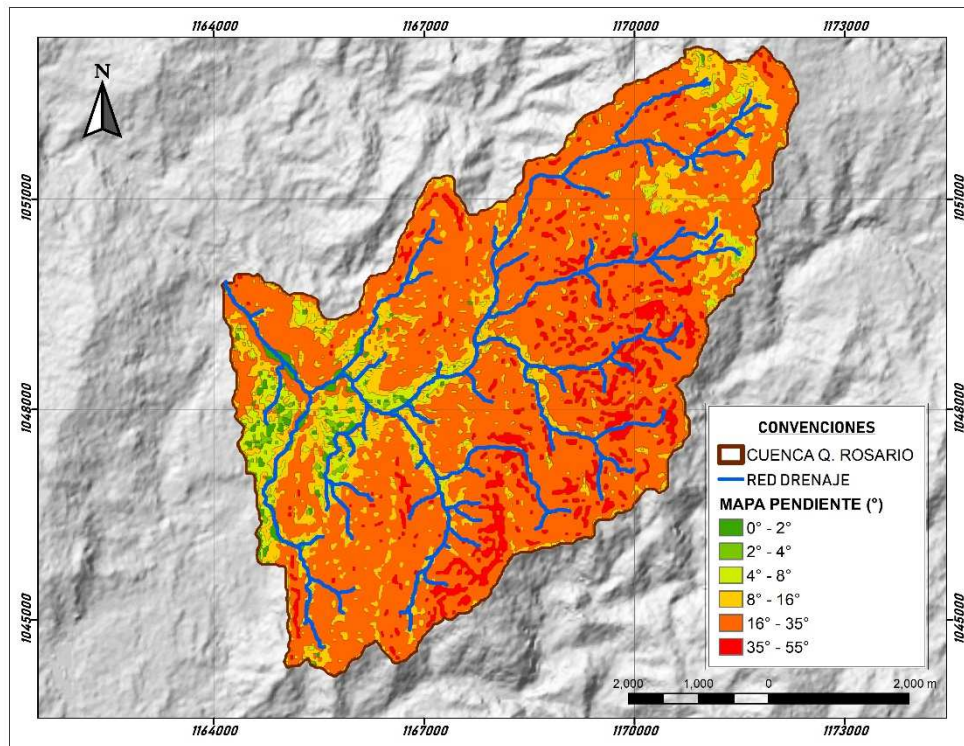


Figura 5-6. Mapa de pendientes clasificada para la cuenca en estudio.

Tabla 5-4. Resumen del factor pendiente para la cuenca de la quebrada El Rosario.

ID	PENDIENTE	CANTIDAD	%CANTIDAD	ÁREA (Ha)	% ÁREA
1	0 - 2	153	8.93%	76.1	1.96%
2	2 - 4	65	3.79%	20.9	0.54%
3	4 - 8	364	21.25%	217.6	5.61%
4	8 - 16	723	42.21%	732.9	18.90%
5	16 - 35	145	8.46%	2557.8	65.98%
6	35 - 55	263	15.35%	271.5	7.00%
TOTAL		1713	100%	3878.0	100%

Del mapa de pendiente se puede observar que los rangos propuestos no representan de la mejor manera las pendientes de la cuenca, pues es posible encontrar laderas de pendientes intermedias para el rango entre 16° y 35°, que de acuerdo a la tabla de resumen del factor ocupa el 66% de la cuenca. En la Tabla 5-5 se presenta el cálculo de pesos de evidencia para la variable pendiente de acuerdo a lo propuesto en la guía de referencia.

Tabla 5-5. Análisis de pesos de evidencia para la variable Pendiente, de acuerdo a las clases propuestas por Van Zuidam (1987).

ID	PENDIENTE (°)	MOV.	% MOV.	CLASE	% CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
1	35 - 55	645	15.8%	14391	5.8%	645	3438	13746	230431	1.032	-0.114	1.146
2	16 - 35	2984	73.1%	177579	71.5%	2984	1099	174595	69582	0.022	-0.057	0.079
3	2 - 4	0	0.0%	987	0.4%	0	4083	987	243190	0.000	0.004	-0.004
4	0 - 2	0	0.0%	3467	1.4%	0	4083	3467	240710	0.000	0.014	-0.014
5	8 - 16	378	9.3%	40593	16.4%	378	3705	40215	203962	-0.576	0.083	-0.659
6	4 - 8	76	1.9%	11243	4.5%	76	4007	11167	233010	-0.899	0.028	-0.927

De los valores de pesos de evidencia se puede observar que el mayor rango de pendiente es el de mayor peso debido a su proporción entre el área deslizada y la poca extensión de ese rango en la cuenca.

▪ **CURVATURA**

De acuerdo a la propuesta planteada, se realizó el mapa de curvatura que se presenta en la Figura 5-7. La clasificación se hizo en 7 rangos, el resumen del mapa para la cuenca se presenta en la

Tabla 5-6.

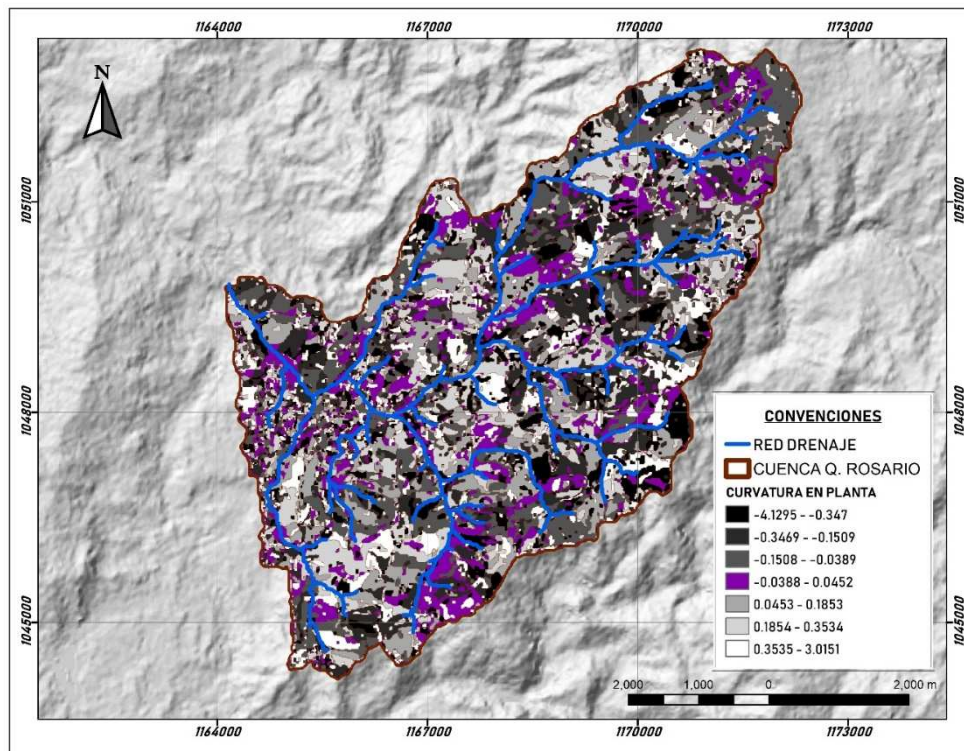


Figura 5-7. Mapa de curvatura en planta clasificado para la cuenca de la quebrada El Rosario.

Tabla 5-6. Resumen del factor curvatura para la cuenca de la quebrada El Rosario.

ID	CURVATURA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	%CANTIDAD	ÁREA (Ha)	% ÁREA
1	-4.1295 - -0.347	MUY CONVEXA	1189	17.46%	518.9	13.38%
2	-0.3469 - -0.1509	CONVEXA	756	11.10%	582.0	15.00%
3	-0.1508 - -0.0389	LEVEMENTE CONVEXA	649	9.53%	571.6	14.73%
4	-0.0388 - 0.0452	PLANA	653	9.59%	567.9	14.64%
5	0.0453 - 0.1853	LEVEMENTE CONCAVA	1909	28.03%	547.7	14.12%
6	0.1854 - 0.3534	CONCAVA	1122	16.48%	459.3	11.84%
7	0.3535 - 3.0151	MUY CONCAVA	532	7.81%	631.7	16.28%
TOTAL			6810	100%	3878.0	100%

De la tabla se puede observar que no existe una gran diferencia entre la proporción de cada rango de curvatura respecto al área de toda la cuenca. Sin embargo, se observa que

la curvatura levemente cóncava predomina con el 28.03% de las zonas homogéneas de ladera definidas para la cuenca.

El análisis de pesos de evidencia se presenta en la Tabla 5-7. Como resultado se puede analizar que la clase que mejor representa los procesos de remoción en masa es muy convexa. El resultado es consecuente con la definición de los efectos de la curvatura en los movimientos en masa, siendo las superficies convexas en planta las encausan mayor agua de escorrentía, generando aumento en las presiones de poro, movimientos en masa y erosión.

Tabla 5-7. Análisis de pesos de evidencia para la variable curvatura para las siete clases definidas.

ID	CURVATURA	MOV	%MOV	CLASE	%CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
1	-4.1295 - -0.347	853	20.9%	33211	13.4%	853	3230	32358	211819	0.455	-0.092	0.547
2	-0.3469 - -0.1509	747	18.3%	37248	15.0%	747	3336	36501	207676	0.202	-0.040	0.242
3	0.3535 - 3.0151	590	14.5%	29396	11.8%	590	3493	28806	215371	0.203	-0.031	0.233
4	0.0453 - 0.1853	580	14.2%	36580	14.7%	580	3503	36000	208177	-0.037	0.006	-0.043
5	-0.1508 - -0.0389	543	13.3%	40426	16.3%	543	3540	39883	204294	-0.206	0.036	-0.241
6	-0.0388 - 0.0452	416	10.2%	35052	14.1%	416	3667	34636	209541	-0.331	0.046	-0.376
7	0.1854 - 0.3534	354	8.7%	36347	14.6%	354	3729	35993	208184	-0.531	0.069	-0.600

5.4.2 Geología

El levantamiento de geología necesario para los análisis de susceptibilidad requiere de un importante detalle de ingeniería, definiendo la geología en términos de formaciones superficiales. En este factor se definen e integran las características particulares de los materiales del sitio de estudio de manera detallada, teniendo en cuenta la génesis, la litología, las propiedades ingenieriles, el grado de meteorización y los rasgos estructurales, entre otras que permitan entender el posible comportamiento de los materiales y los mecanismos de falla.

Se debe tener en cuenta que un levantamiento de geología en términos de formaciones superficiales para un área de 4000 Ha de toda la cuenca, tiene unos requerimientos en costos importante, pues se requieren varios frentes de trabajo, ensayos y tiempo para un adecuado levantamiento.

Para el presente trabajo no se contaron con los suficientes recursos, personal y tiempo para el levantamiento detallado del mapa de geología de formaciones superficiales, por lo que se utilizó el mapa de geología a partir de información antecedente.

De acuerdo a lo anterior, la geología del sitio de estudio es obtenida de diferentes documentos entre los que se encuentran: el Documento Técnico de Soporte (DTS) del POMCA del río Chinchiná (CORPOCALDAS & UNAL, 2017), el Estudio de Suelos Semidetallado para los municipios de Manizales, Chinchiná, Palestina, Neira y Villamaría (IGAC & CORPOCALDAS, 2013). El DTS del POT del municipio de Manizales, en su última versión del año 2017 y el DTS del estudio geológico del Plan Parcial del Rosario de la Alcaldía de Manizales (CORREA & HINCAPIE, 2010).

De acuerdo a lo anterior, se cuenta con el mapa de unidades geológicas a escala 1:2500. En la cuenca de estudio se identifican seis (6) unidades geológicas que se pueden apreciar en mapa presentado en la Figura 5-8, a continuación.

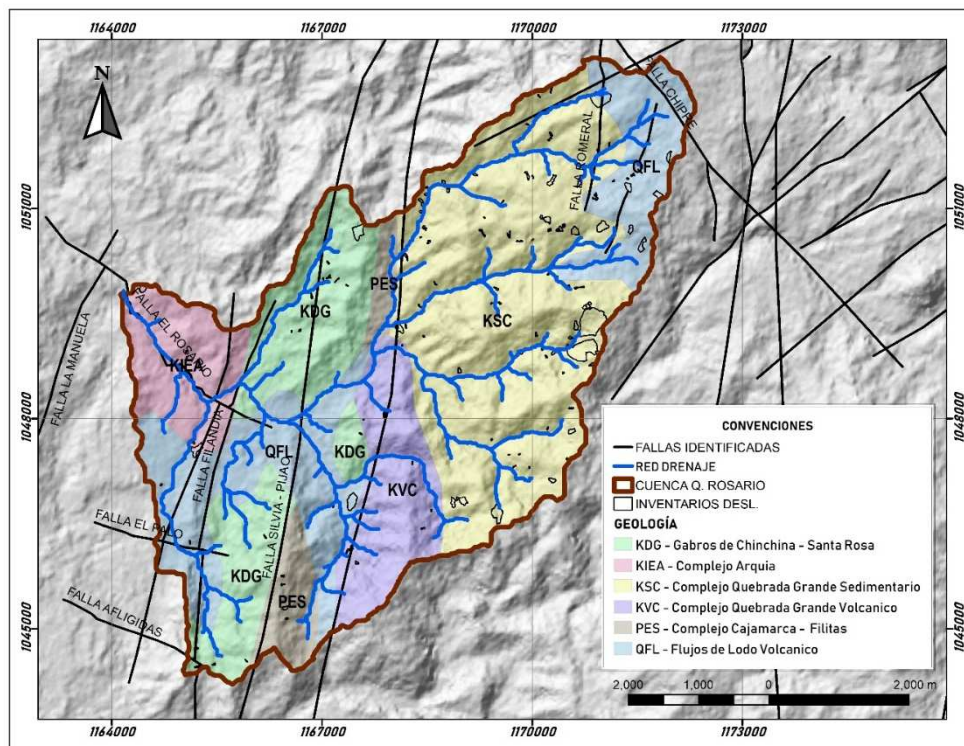


Figura 5-8. Mapa de geología de la cuenca de la quebrada EL Rosario.

POMCA Chinchiná – Adaptación propia

Del mapa se puede observar que la mayoría de deslizamientos se presentan sobre la formación Complejo Quebrada Grande miembro sedimentario (KSC), en color amarillo. También se pueden observar el sistema de fallas que atraviesan la cuenca.

- **UNIDADES GEOLÓGICAS**

Complejo Quebradagrande: Constituye gran parte del flanco occidental de la cordillera Central. Es caracterizado por intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentarias presentando amplias variaciones tanto en la secuencia sedimentaria como en la relación entre flujos volcánicos y capas piroclásticas. El complejo Quebradagrande tiene como límite oriental la falla San Jerónimo, que lo separa de las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca y como límite occidental la falla Silvia – Pijao, que lo separa de las metamorfitas del Complejo Arquía. El Complejo Quebradagrande sufre un intenso fallamiento permitiendo el emplazamiento de algunos cuerpos de gabro (Ingeominas, 2001 b).

Las litologías predominantes en el Complejo Quebradagrande se agrupan informalmente en miembro sedimentario y miembro volcánico. De acuerdo con Ingeominas (2001 a) el contacto entre estos dos miembros se debe probablemente al comportamiento mecánico entre ambos tipos de roca, donde el contacto actúa como una zona de debilidad a lo largo de la cual se transmiten esfuerzos y deformaciones, afectando principalmente al miembro sedimentario por su menor competencia.

Sus afloramientos muestran bloques imbricados de rocas deformadas en las que es común la presencia de foliación milonítica de dirección NNE – SSW y buzamiento al este (González, 1980; Lozano et al.,1975) en (Ingeominas, 2001a). La deformación impide la identificación de secuencias estratigráficas, por lo cual las unidades litoestratigráficas carecen de límites precisos. Los afloramientos de este complejo en la vía Chinchiná - Manizales muestra pequeños cuerpos elongados en el sentido de las estructuras regionales.

- *Complejo Quebradagrande Volcánico (Kvc)*: está constituido por espilitas, basaltos y diabasas de características toleíticas, con algunas brechas de flujo y tobas en franjas alargadas. Se encuentra en contacto tectónico con el miembro sedimentario a lo largo del sistema de fallas de romeral. Las rocas más características están compuestas por plagioclasa sódica y clinopiroxeno. Cerca de las zonas de falla, los efectos dinámicos generan una roca de estructura esquistosa de color verde, similar a la desarrollada por metamorfismo regional (Ingeominas, 2001 a).
- *Complejo Quebradagrande sedimentario (Ksc)*: está constituido predominantemente por lutitas carbonosas, las cuales se presentan finamente laminadas tomando localmente una estructura pizarrosa a esquistosa con superficies brillantes que le imprimen una foliación aparente. En menor proporción está constituido por grauvacas, arenitas feldespáticas, limolitas, liditas y, localmente, capas de caliza. Son comunes las venas de cuarzo lechoso paralelas a los planos de estratificación o planos de cizalladura. Las arenitas son de grano fino a medio, con clastos bien seleccionados de líticos volcánicos y de cristales de plagioclasa, con escaso cuarzo. De manera escasa se encuentran algunas capas de conglomerados o arenitas conglomeráticas y las liditas aparecen como láminas de espesor variable intensamente fracturadas y plegadas. Presenta una tendencia regional de buzamiento al este formando junto al Complejo Cajamarca una estructura monoclinal con buzamiento al oriente.

Complejo Cajamarca – filitas (Pes): Las rocas del Complejo Cajamarca constituyen el núcleo de la cordillera Central; afloran al este de la falla San Jerónimo y corresponden a una secuencia polimetamórfica que presenta un intenso plegamiento el cual no permite estimar con precisión el espesor ni determinar la base ni el techo. Este complejo varía ampliamente en composición y es el resultado de varios episodios metamórficos regionales a los cuales se superponen efectos térmicos o dinámicos de intensidad variable. Se divide en tres grupos composicionales: Grupo Pelítico (constituido por filitas, esquistos sericiticos y micáceos y metasedimentitas), Grupo Cuarzoso (constituido por Cuarcitas) y Grupo Básico (constituido por esquistos verdes y anfibolitas). En la zona de estudio afloran principalmente filitas. Por lo general presentan un intenso plegamiento y regionalmente tiene estructura isóclina con buzamiento al este (Ingeominas, 2001 a).

Complejo Arquía (Kiea): Según Maya & González (1995) en Ingeominas (2001 b) el Complejo Arquía se refiere al conjunto de rocas metamórficas de media a alta presión en su formación, localmente asociadas con peridotitas serpentinizadas, localizadas al occidente del complejo Quebradagrande y limitadas tectónicamente al este por la falla Silvia Pijao y al Oeste por la falla Cauca – Almaguer.

Stock de Chinchiná y Santa Rosa (Kdg): Corresponde a rocas gabroides y dioritas, dispuestas de forma alargada y paralela a la falla Romeral, entre Chinchiná y Santa Rosa. En la zona de la quebrada el Rosario se observa una roca inequigranular con cristales de biotita, hornblenda, plagioclasa y cuarzo que se encuentra en contacto con los depósitos fluviovolcánicos, asociados a la actividad del Volcán Nevado del Ruiz (CORREA & HINCAPIE, 2010).

Depósitos de flujo de lodo volcánico (Qfl): Según CORREA & HINCAPIE (2010) estos depósitos corresponden a flujos de lodo volcánico (Lahar) donde se localizan gran parte de las ciudades de Manizales, Chinchiná, Neira, Villamaría y Aránzazu, ocupan la parte baja de los ríos Chinchiná y Guacaica. Son producto de la actividad explosiva de los volcanes del área y sus correspondientes flujos de escombros al presentarse un deshielo por vulcanismo. Representan la actividad volcánica de los últimos 100.000 años del periodo cuaternario. Forman parte de los depósitos volcanoclásticos donde a grandes rasgos se reconocen flujos de lodo, depósitos de flujo piroclástico y varios niveles de turberas los cuales no se encuentran muy afectados por la tectónica de la zona y forman llanuras con dirección oeste (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989) Estos flujos de lodo volcánico enmascaran las relaciones entre las diferentes unidades de roca (Ingeominas, 2001b).

▪ **MARCO TECTÓNICO**

El sistema de fallas más importante de la zona se encuentra representado por las fallas Cauca – Romeral al Oeste y la falla Palestina al Este con direcciones variables NNE – SSW y NE – SW coincidiendo con las direcciones generales de los sistemas tectónicos de

la cadena Andina. El sistema de fallas representativo en la zona de la quebrada El Rosario se describe a continuación:

- *Sistema de fallas de Romeral*: Según Ingeominas (2001a) este sistema de fallas se extiende por más de 1200 km en dirección norte sur, la deformación se manifiesta a lo largo de toda la traza del sistema. Está compuesto por numerosas fallas paralelas a subparalelas de dirección N – S. Las principales fallas de rumbo aledañas a la zona de estudio son: la falla San Jerónimo al este (pone en contacto rocas del Complejo Cajamarca al este con rocas del Complejo Quebradagrande al oeste), la falla Cauca – Almaguer (Define el límite occidental del Complejo Arquía) y la falla Silvia Pijao (pone en contacto el Complejo Arquía y el Complejo Quebradagrande), de acuerdo con CORREA & HINCAPIE (2010) esta falla representa el límite estructural más oriental cerca de la zona de estudio. Entre las fallas San Jerónimo y Silvia – Pijao, las unidades de roca se presentan tectonizadas en mayor o menor grado conformando unidades estructurales separadas por fallas de alto ángulo de dirección y buzamiento variable, y por bloques tectónicos producto de una actividad tectónica compresiva que pudo haber causado la formación de grandes sistemas de fallas de rumbo.

En la zona de la quebrada El Rosario se encuentra además un conjunto de fallas y trazos menores pertenecientes al sistema de fallas Romeral en dos direcciones principales según CORREA & HINCAPIE (2010) una en dirección NNE y otra WNW. Generalmente dejan rasgos estructurales como valles asimétricos amplios y fuertemente erosionados, cambios altimétricos en cuchillas, silletas, facetas triangulares, control de cauces y hombreras alineadas.

Subsistema de fallas NNE: Corresponde a estructuras en dirección NS y paralelas entre sí representados por la falla Filandia Oeste, falla Chinchiná y falla La Manuela.

- *Falla Filandia Oeste*: Fue reportada y denominada por Naranjo & Ríos (1989), pone en contacto rocas metagabroicas con las anfibolitas del Complejo Arquía. Limita el extremo oriental de la zona de estudio en dirección N – S con tendencia al NNE (Montaño & Salazar, 2010).

- Falla Chinchiná: Es una falla paralela a la falla Filandia Oeste, localizada aproximadamente a 200 m al occidente de la misma que atraviesa la zona de estudio de sur a norte con tendencia al NNW. Pone en contacto rocas del Stock de Chinchiná – Santa Rosa con los esquistos del Complejo Arquía. Esta falla se encuentra cubierta por depósitos fluviovolcánicos por lo que en la zona no presenta rasgos estructurales marcados, sin embargo, presenta continuidad hacia el norte de la zona con rasgos estructurales marcados NNE (CORREA & HINCAPIE, 2010)

- Falla La Manuela: Presenta una dirección NNE, se encuentra en el extremo occidental de la zona de estudio cortando los esquistos negros del Complejo Arquía. Atraviesa la margen izquierda aguas abajo del río Chinchiná en dirección S – N.

Sistema de fallas WNW: Estas estructuras presentan dirección WNW, cortando y desplazando el sistema de fallas NNE, por esta razón son considerados como trazos más recientes. Se destacan la Falla Afligidos, Falla El Palo, Falla El Rosario.

- Falla Afligidos: Es la falla que se localiza más al sur de la zona de estudio. Según Echavarría et al., (1991) en (CORREA & HINCAPIE, 2010) se prolonga hacia el S – E con una dirección aproximada N 75°- 80° W y desplaza la traza de la falla Romeral.

- Falla El Palo: Esta falla se encuentra al norte de la falla Afligidos, en la zona de estudio y se encuentra cubierta por depósitos fluviovolcánicos, pudiéndose distinguir los rasgos estructurales hacia el occidente de la zona de estudio. Según CORREA & HINCAPIE (2010) fue nombrada por Sánchez (2005) como una falla normal con dirección N 65° W.

- Falla El Rosario: Es el rasgo estructural ubicado más norte de la zona de estudio. Presenta un fuerte control estructural del río Chinchiná y la Quebrada El Rosario, recorriendo la zona en sentido NNW con tendencia N 45° W con rasgos estructurales muy marcados.

De acuerdo a lo anterior, la zona de estudio tiene una tectónica compleja. Varios autores proponen cómo factor condicionante de inestabilidad la distancia a las fallas. Sin embargo,

en la construcción del mapa de geología se presentan implícitas las fallas que delimitan generalmente los contactos entre las unidades geológicas. En la Tabla 5-8. Resumen de las clases del factor geología para los análisis de susceptibilidad. Tabla 5-8 se presenta el resumen de las clases del mapa de geología.

Tabla 5-8. Resumen de las clases del factor geología para los análisis de susceptibilidad.

ID	CONVENCIÓN	CANTIDAD	%CANTIDAD	ÁREA (ha)	% ÁREA
1	KDG - Stock de Chinchiná y Santa Rosa	3	30.00%	667.0	17.20%
2	QFL - Depósitos de Flujo de Lodo Volcánico	2	20.00%	851.1	21.94%
3	PES - Complejo Cajamarca - Filitas	2	20.00%	185.3	4.78%
4	KVC - Complejo Quebradagrande Volcánico	1	10.00%	374.4	9.65%
5	KSC - Complejo Quebradagrande Sedimentario	1	10.00%	1504.1	38.77%
6	KIEA - Complejo Arquía	1	10.00%	297.3	7.66%
TOTAL		10	100%	3878.0	100%

De la tabla se puede observar que en la mayor parte de la cuenca se encuentra el Complejo Quebradagrande Sedimentario, en la parte media de la cuenca. En la Tabla 5-9 se presenta el resultado del análisis mediante pesos evidencia para las clases del factor geología.

Tabla 5-9. Análisis de pesos de evidencia para el factor geología.

ID	GEOLOGÍA	MOV.	%MOV.	CLASE	%CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
1	KDG	258	6.3%	42699	17.2%	258	3825	42441	201736	-1.012	0.126	-1.138
2	QFL	752	18.4%	54496	22.0%	752	3331	53744	190433	-0.178	0.045	-0.223
3	PES	46	1.1%	11860	4.8%	46	4037	11814	232363	-1.457	0.038	-1.496
4	KVC	82	2.0%	23933	9.6%	82	4001	23851	220326	-1.582	0.082	-1.664
5	KSC	2812	68.9%	96246	38.8%	2812	1271	93434	150743	0.000	-0.685	0.685
6	KIEA	133	3.3%	19026	7.7%	133	3950	18893	225284	-0.865	0.047	-0.913

De la tabla se pudo concluir que la clase de mayor peso en la influencia a la inestabilidad corresponde al Complejo Quebradagrande Sedimentario (KSC), que es el de mayor extensión en la cuenca y donde ocurren la mayoría de procesos de remoción en masa.

5.4.3 Cambio en la Cobertura del Terreno y Uso del Suelo

A continuación, se presenta la construcción de los mapas de cambio en la cobertura de la tierra y uso del suelo de la cuenca en estudio de acuerdo a la metodología propuesta en la guía de referencia del Servicio Geológico Colombiano.

- **Recopilación y análisis de información**

Inicialmente se revisó la información de deforestación para el sitio de estudio presentada en el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC) en la web: <http://smbyc.ideam.gov.co>. Se encontraron nueve épocas con análisis de cobertura de la tierra términos de deforestación, comprendidas entre los años: 1990-2000, 2000-2005, 2005-2010, 2010-2012, 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016. En la Figura 5-9 se presenta el último periodo de análisis de cambios en la cobertura de la tierra por deforestación.

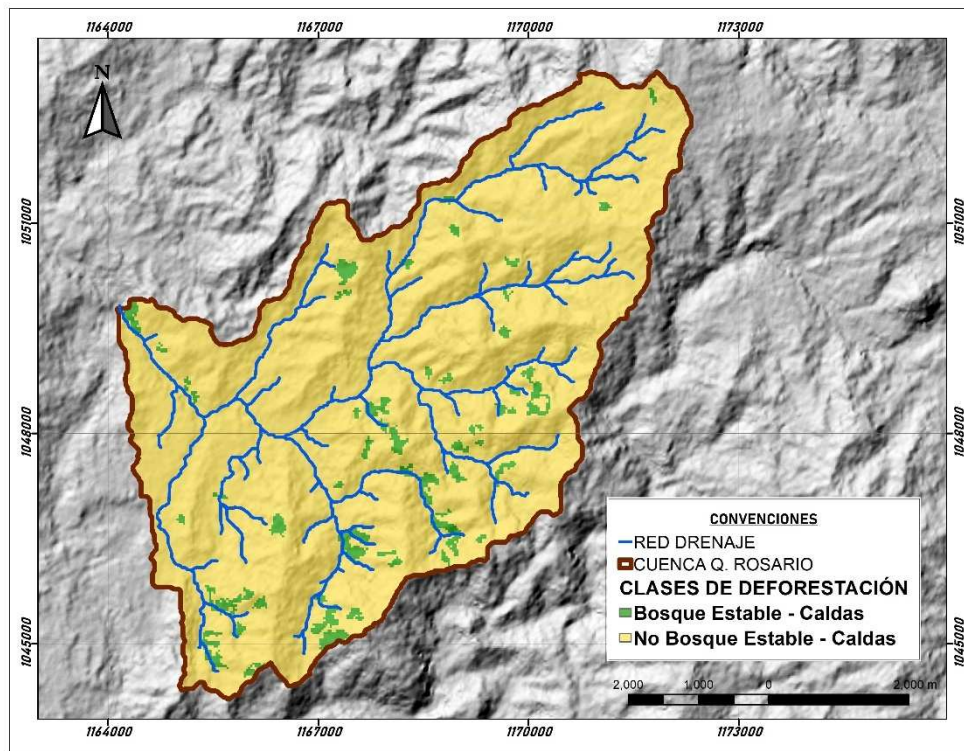


Figura 5-9. Cambio en la superficie de bosque natural para la cuenca en el periodo 2016 – 2015.

SMBYC (IDEAM, 2018)

De acuerdo a los mapas consultados, la mayor parte de la cuenca de la quebrada El Rosario corresponde a la cobertura de No Bosque Estable, que se puede observar en color habano. Las manchas de color verde corresponden a la cobertura de Bosque Estable. De la figura se puede observar que no existen zonas de deforestación entre el periodo 2015 y 2016.

De acuerdo a la Tabla 4-11 de la metodología propuesta, la zona denominada como No Bosque Estable, corresponde a un grado de cambio medio, por lo cual es necesario realizar un análisis completo de la cobertura del terreno.

Como capa de cobertura para el tiempo anterior se utiliza el mapa de cobertura oficial de la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) del año 2010.

Para la construcción del mapa de cobertura para el tiempo actual se analizaron 24 imágenes satelitales de diferentes fechas del proyecto satelital Sentinel-2, buscando la mejor imagen en términos de visibilidad debida a las nubes y teniendo en cuenta la cercanía temporal respecto al inventario de movimientos en masa. En la Figura 5-10 se presenta una comparación de imágenes con diferente nubosidad para la cuenca en estudio.

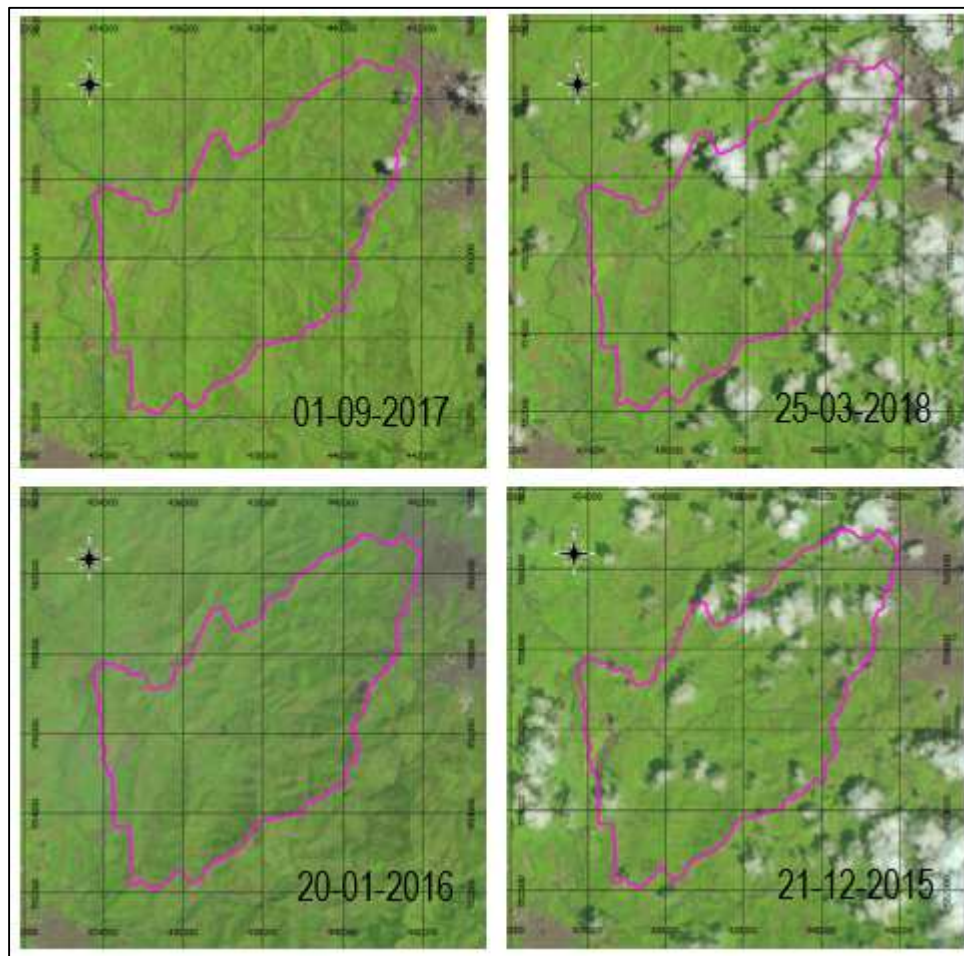


Figura 5-10. Comparación de imágenes respecto de la calidad de visualización de la información.

De la comparación entre las imágenes se seleccionó la imagen de fecha 20/01/2016, pues no se presenta nubes y se acerca a los años de levantamiento del inventario de deslizamientos (2014-2015), la imagen seleccionada se puede observar en la parte inferior izquierda de la figura anterior. Cuando no se tiene una imagen completa de la zona de

estudio, se recomienda realizar mosaicos con información de diferentes fechas lo más cercanas posibles.

▪ Cobertura de la tierra en el tiempo actual (CCT-t1)

Para la construcción de esta capa se utilizó la imagen de fecha 20/01/2016 del proyecto Sentinel-2. Se utilizó la herramienta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) del software de sistemas de información geográfica QGIS 3.0 Girona. El conjunto de bandas utilizadas es: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 11 y 12 cuyas características se presentaron en el capítulo de la propuesta metodológica

Para identificar las coberturas se realizan composiciones de bandas de acuerdo al modelo de colores RGB, buscando resaltar algunas características de la cobertura de la cuenca en estudio. En la Figura 5-11 se presentan tres combinaciones de bandas, que permite observar atributos en la identificación de coberturas de la tierra.

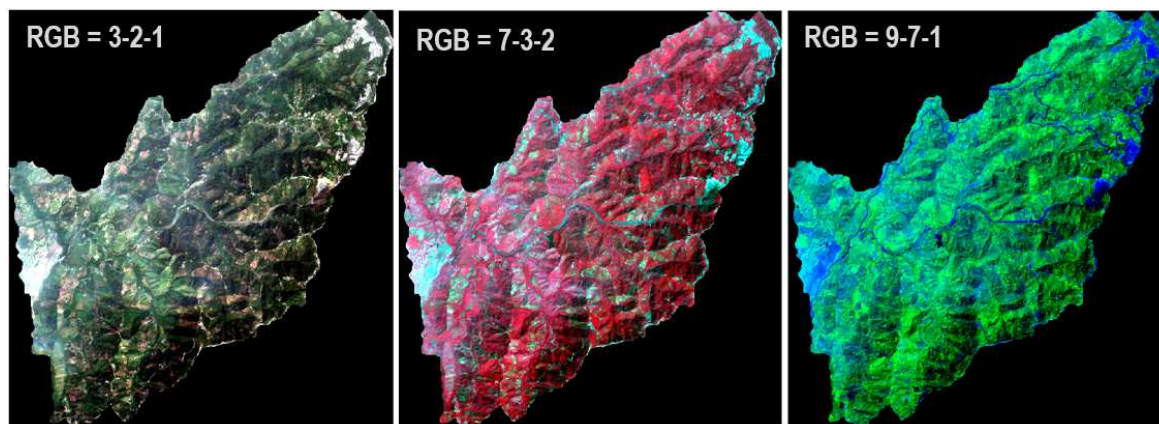


Figura 5-11. Muestra de tres combinaciones de bandas en el modelo RGB para la identificación de coberturas de la tierra para la cuenca de la quebrada El Rosario.

Las combinaciones de bandas presentadas en la figura anterior corresponden a la combinación de los valores centrales de reflectancia de cada una de las bandas de acuerdo a la herramienta de QGIS utilizada. La imagen de la izquierda es una composición en color real, la segunda corresponde a la composición que resalta la vegetación, teniendo en cuenta

principalmente la banda del infrarrojo y la imagen de la derecha corresponde a una composición que resalta zonas con agricultura.

La clasificación de coberturas se realizó mediante el método de clasificación supervisada, definiendo áreas de similar cobertura para que luego el software asocie el resto de la cuenca a las coberturas delimitadas manualmente. El mapa de cobertura de la tierra en el tiempo actual (CCT-t1) se presenta en la Figura 5-12, a continuación.

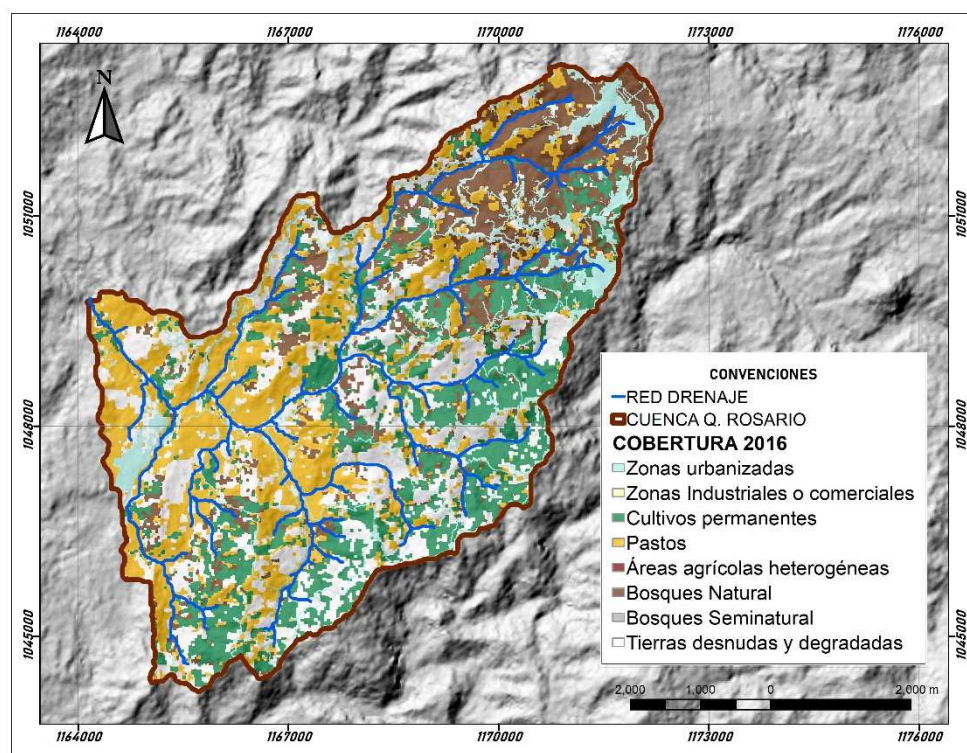


Figura 5-12. Mapa de Cobertura de la Tierra en el tiempo actual CCT-t1, para la cuenca de la quebrada El Rosario.

Elaboración propia

Para la capa de cobertura en el tiempo actual (CCT-t1), a parte de la clasificación realizada de acuerdo a la composición de bandas y clasificación supervisada antes mencionadas, se realizó el complemento de la capa con la información observable y levantada de las imágenes de Google Earth Pro disponibles para la zona de estudio, principalmente las áreas con construcción o intervención antrópica. La capa de vías se obtuvo del banco de

datos de Open Street Maps (OSM), de uso libre bajo licencia Open Database License (ODbL).

▪ **Cobertura de la tierra en el tiempo anterior (CCT-t0)**

A partir del análisis de información antecedente se utiliza el mapa de cobertura de la tierra propuesto por CORPOCALDAS realizado en el año 2010, base fundamental para la elaboración de los documentos técnicos del POMCA del río Chinchiná. En la Figura 5-13 se presenta el mapa de cobertura de la tierra en el tiempo anterior CCT-t0.

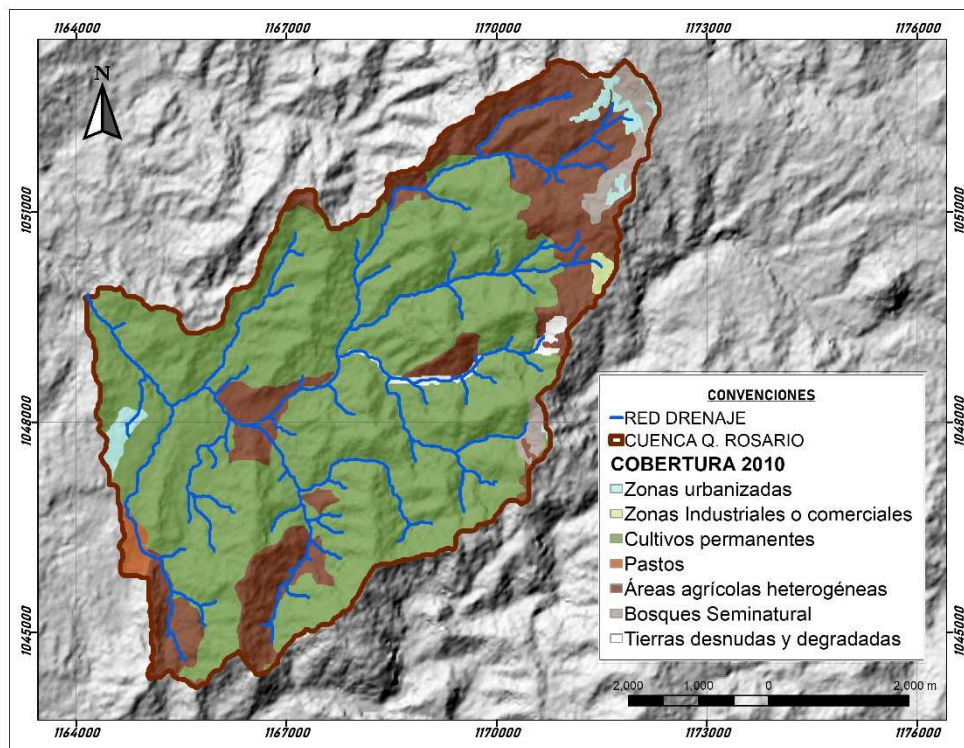


Figura 5-13. Mapa de Cobertura de la Tierra en el tiempo anterior CCT-t0, para la cuenca de la quebrada El Rosario.

Elaboración propia

Para esta capa se realizó una reclasificación de las coberturas definidas en el mapa base respecto a la clasificación de Corine Land Cover enfocada a procesos de remoción en masa (SGC, 2017).

▪ Análisis multitemporal y cambio de coberturas de la tierra

Con las capas de los tiempos actual y anterior, se realizó el análisis multitemporal del cambio de cobertura de la tierra. Se construye una matriz de comparación entre las dos coberturas que permita obtener un código para identificar el cambio. Para el análisis multitemporal se utilizó la herramienta *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) de QGIS.

Del análisis de cambio en la cobertura se obtuvieron 56 posibles combinaciones de cambio de cobertura, sin presentarse todas las posibilidades. Para la cuenca en estudio y con las capas de cobertura actual (2016) y cobertura anterior (2010) se encontraron 37 cambios para la cuenca. En la Tabla 5-10 se presenta la codificación del cambio en la cobertura de la tierra (CC).

Tabla 5-10. Codificación y análisis del cambio en la cobertura de la tierra, en el periodo de análisis para el área de estudio.

Código Cambio	Clase de Referencia	Clase Comparada	Suma de Píxeles	% Cambio	Código de Cambio SGC
1	1	1	2833	1.1%	11
2	1	2	858	0.3%	12
3	1	5	12429	5.0%	15
4	1	6	78	0.0%	16
5	1	7	6096	2.5%	17
6	1	9	1015	0.4%	19
7	1	15	13	0.0%	115
8	2	1	0	0.0%	21
9	2	2	11	0.0%	22
10	2	5	0	0.0%	25
11	2	6	0	0.0%	26
12	2	7	0	0.0%	27
13	2	9	0	0.0%	29
14	2	15	0	0.0%	215
15	5	1	29	0.0%	51
16	5	2	20	0.0%	52
17	5	5	46372	18.7%	55

Código Cambio	Clase de Referencia	Clase Comparada	Suma de Píxeles	% Cambio	Código de Cambio SGC
18	5	6	185	0.1%	56
19	5	7	8268	3.3%	57
20	5	9	1428	0.6%	59
21	5	15	129	0.1%	515
22	6	1	1345	0.5%	61
23	6	2	0	0.0%	62
24	6	5	48081	19.4%	65
25	6	6	1334	0.5%	66
26	6	7	14439	5.8%	67
27	6	9	21	0.0%	69
28	6	15	107	0.0%	615
29	7	1	0	0.0%	71
30	7	2	0	0.0%	72
31	7	5	0	0.0%	75
32	7	6	0	0.0%	76
33	7	7	483	0.2%	77
34	7	9	0	0.0%	79
35	7	15	0	0.0%	715
36	8	1	77	0.0%	81
37	8	2	5	0.0%	82
38	8	5	22620	9.1%	85
39	8	6	95	0.0%	86
40	8	7	16336	6.6%	87
41	8	9	2352	0.9%	89
42	8	15	126	0.1%	815
43	9	1	0	0.0%	91
44	9	2	0	0.0%	92
45	9	5	0	0.0%	95
46	9	6	0	0.0%	96
47	9	7	0	0.0%	97
48	9	9	30	0.0%	99
49	9	15	0	0.0%	915
50	15	1	270	0.1%	151
51	15	2	8	0.0%	152
52	15	5	47194	19.0%	155

Código Cambio	Clase de Referencia	Clase Comparada	Suma de Píxeles	% Cambio	Código de Cambio SGC
53	15	6	374	0.2%	156
54	15	7	11022	4.4%	157
55	15	9	473	0.2%	159
56	15	15	1704	0.7%	1515

La gran variabilidad observada en el análisis multitemporal puede ser debida a las escalas de las dos coberturas utilizadas y a la variabilidad en la interpretación de las coberturas de las dos capas. En la última columna de la tabla presenta anteriormente se presenta la codificación para el mapa de cambio en la cobertura.

Para incorporar el concepto de cambio de cobertura se requiere determinar el grado de Persistencia, Pérdida y Ganancia de coberturas. En la Tabla 5-11 se presenta la codificación para la evaluación del tipo de cambio de acuerdo a los resultados obtenidos.

Tabla 5-11. Matriz de Persistencia, Pérdida y Ganancia de coberturas para la cuenca de la quebrada El Rosario

MATRIZ_CC_V0		2016																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2010	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141	151	161	171	181	191	201
	2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112	122	132	142	152	162	172	182	192	202
	3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103	113	123	133	143	153	163	173	183	193	203
	4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144	154	164	174	184	194	204
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195	205
	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126	136	146	156	166	176	186	196	206
	7	17	27	37	47	57	67	77	87	97	107	117	127	137	147	157	167	177	187	197	207
	8	18	28	38	48	58	68	78	88	98	108	118	128	138	148	158	168	178	188	198	208
	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189	199	209
	10	110	210	310	410	510	610	710	810	910	1010	1110	1210	1310	1410	1510	1610	1710	1810	1910	2010
	11	111	211	311	411	511	611	711	811	911	1011	1111	1211	1311	1411	1511	1611	1711	1811	1911	2011
	12	112	212	312	412	512	612	712	812	912	1012	1112	1212	1312	1412	1512	1612	1712	1812	1912	2012
	13	113	213	313	413	513	613	713	813	913	1013	1113	1213	1313	1413	1513	1613	1713	1813	1913	2013
	14	114	214	314	414	514	614	714	814	914	1014	1114	1214	1314	1414	1514	1614	1714	1814	1914	2014
	15	115	215	315	415	515	615	715	815	915	1015	1115	1215	1315	1415	1515	1615	1715	1815	1915	2015
	16	116	216	316	416	516	616	716	816	916	1016	1116	1216	1316	1416	1516	1616	1716	1816	1916	2016
	17	117	217	317	417	517	617	717	817	917	1017	1117	1217	1317	1417	1517	1617	1717	1817	1917	2017
	18	118	218	318	418	518	618	718	818	918	1018	1118	1218	1318	1418	1518	1618	1718	1818	1918	2018
	19	119	219	319	419	519	619	719	819	919	1019	1119	1219	1319	1419	1519	1619	1719	1819	1919	2019
	20	120	220	320	420	520	620	720	820	920	1020	1120	1220	1320	1420	1520	1620	1720	1820	1920	2020

La diagonal principal de la matriz corresponde a las zonas de Persistencia (azul) es decir las que no han cambiado en el tiempo, en la parte inferior de la matriz se ubican las zonas de Pérdida (verde) de cobertura, es decir áreas que tenían una cobertura antes y otra ahora y la zona superior de la matriz corresponde a la Ganancia (amarillo) de cobertura, es decir áreas de una cobertura que aumentaron su tamaño. En la tabla se resaltan en rojo los

códigos que en la codificación propuesta tienen valores numéricos similares que se deben tener en cuenta en interpretación adecuada en los resultados, pues unos varían en el tipo de cambio, siendo unos de pérdida y otros de ganancia de cobertura.

El mapa de cambio de cobertura de la tierra para la cuenca en estudio se presenta en la Figura 5-14, en la que se observan las zonas de persistencia, pérdida y ganancia de cobertura.

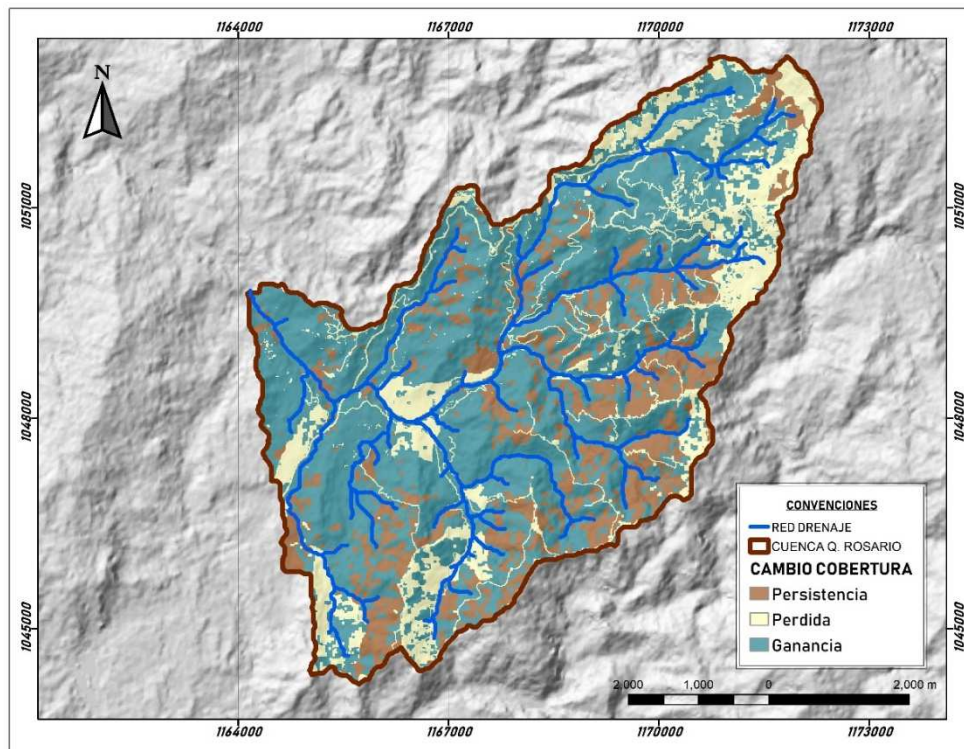


Figura 5-14. Mapa de cambio de cobertura del terreno para la cuenca de la quebrada El Rosario.

En la Tabla 5-12 se presenta el resultado del análisis por pesos de evidencia para el factor cambio en la cobertura para la cuenca de estudio. De la tabla se puede observar que la clase que mejor representa las zonas inestables corresponde a la ganancia de cobertura, debido a su extensión en el mapa de más del 60%.

Tabla 5-12. Resultados del análisis de pesos de evidencia para la variable Cambio en la Cobertura del terreno.

ID	CAMBIO COBERTURA	MOV.	% MOV.	CLASE	% CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
1	Persistencia	399	9.8%	51063	20.6%	399	3684	50664	193513	-0.753	0.130	-0.883
2	Perdida	763	18.7%	47544	19.2%	763	3320	46781	197396	-0.025	0.006	-0.031
3	Ganancia	2921	71.5%	149653	60.3%	2921	1162	146732	97445	0.174	-0.338	0.512

Por otra parte, el mapa de uso del suelo corresponde al mismo mapa de cobertura de la tierra en el tiempo actual (CCT-t1), clasificado en términos del uso. En la Figura 5-15, se presenta el mapa de uso del suelo para la cuenca.

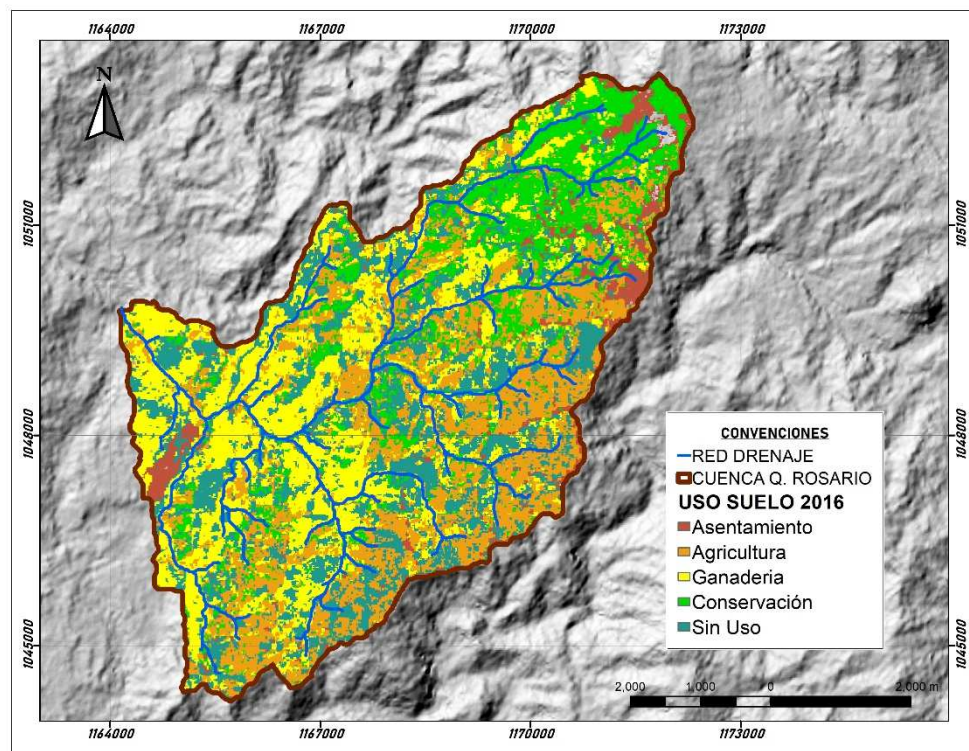


Figura 5-15. Mapa de uso del suelo para la cuenca en estudio.

En la Tabla 5-13 se presenta el resultado del análisis de pesos de evidencia para la variable uso de suelo.

Tabla 5-13. Análisis de pesos de evidencia para la variable uso del suelo.

ID	USO SUELO	MOV.	%MOV.	CLASE	%CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
1	Asentamiento	200	4.9%	23322	9.4%	200	3883	23122	221055	-0.659	0.049	-0.708
2	Agricultura	566	13.9%	56431	22.7%	566	3517	55865	188312	-0.501	0.111	-0.612
3	Ganadería	638	15.6%	65327	26.3%	638	3445	64689	179488	-0.528	0.138	-0.666
4	Conservación	634	15.5%	41611	16.8%	634	3449	40977	203200	-0.078	0.015	-0.093
5	Sin uso	2045	50.1%	61045	24.6%	2045	2038	59000	185177	0.729	-0.418	1.147

De la tabla se puede observar, que el mayor peso corresponde a la clase de Sin Uso, la cual hace referencia a tierras desnudas y degradadas, son áreas abiertas, sin o con poca vegetación. Esto debido a que los mismos polígonos que representan deslizamientos son áreas descubiertas de vegetación.

5.4.4 Factor N – Clasificación agrológica de suelos

Como factor N adicional para la evaluación de la susceptibilidad se propone utilizar el mapa de clasificación agrológica del suelo disponible del estudio semidetallado de suelos para la cuenca del río Chinchiná (IGAC & CORPOCALDAS, 2013). La clasificación del suelo agrológica se realiza en las capas más superficiales del terreno, describiendo las mejores condiciones para el cultivo. Los aspectos que se tienen en cuenta son: la textura, la presencia de materia orgánica, el pH, la pendiente, entre otras.

El mapa de clasificación agrológica de suelos se presenta en la Figura 5-16, se puede observar que en la cuenca predomina el suelo correspondiente a la Asociación Chinchiná-Azufrado (CLef1), la cual corresponde a depósitos espesos de cenizas volcánicas, bien drenados, ligeramente ácidos a muy ácidos, con contenidos altos a regulares de materia orgánica, moderada zona de aptitud forestal productora-protectora y se describe que existe la posibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa superficiales como deslizamientos y erosión (IGAC & CORPOCALDAS, 2013). La clasificación y descripciones de los materiales presentes en la cuenca se pueden consultar en la Tabla 5-14.

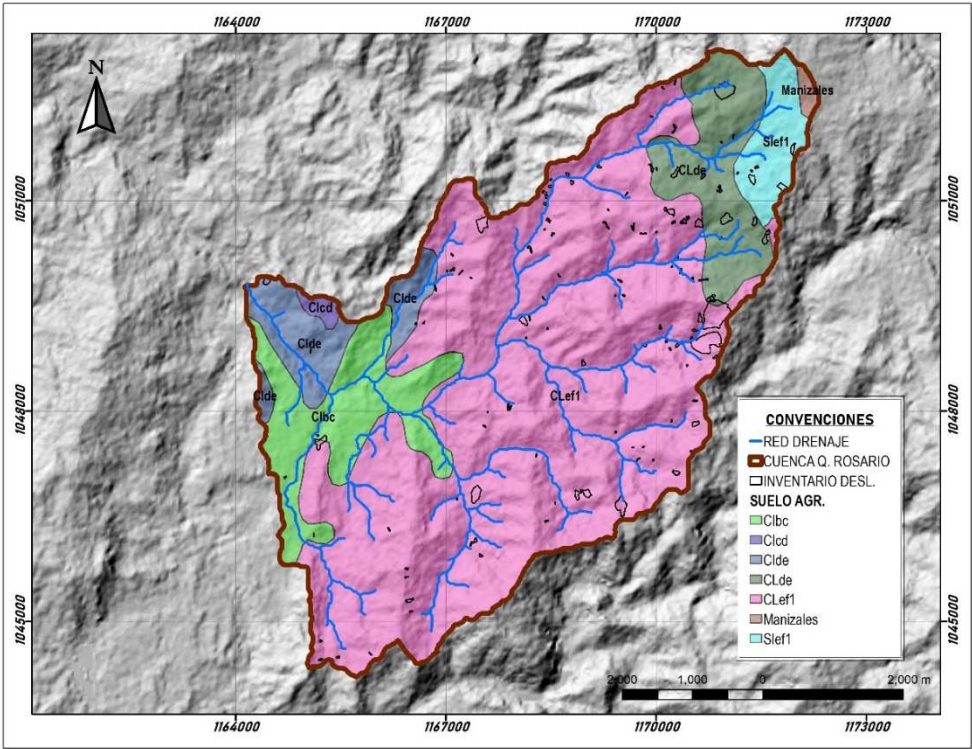


Figura 5-16. Mapa de clasificación agrológica del suelo para la cuenca de la Quebrada El Rosario.

POMCA Chinchiná – Adaptación propia

Tabla 5-14. Descripción agrológica de los suelos encontrados en la zona de estudio.

CONVENCION	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Clef1	ASOCIACIÓN CHINCHINÁ - AZUFRADO	montaña, vertientes, relieve fuertemente quebrado a escarpado, algunos sectores de relieve quebrado, pendientes largas y empinadas, medio húmedo y muy húmedo, depósitos espesos de cenizas volcánicas y piedras metamórficas, erosión en escurrimientos difusos, desprendimientos y deslizamientos, profundos a superficiales, bien a excesivamente drenados, texturas variables, ligeramente ácidos a muy ácidos, contenidos altos a regulares de materia orgánica, moderada, zona de aptitud forestal productora-protectora, Chinchiná - azufrado - el cedral, typic dystrandept - typic troporthent - typic hapludoll, pc-5 - pc-15 - c-112, 40 - 30 - 30, Vlls

CONVENCION	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Clde	CONSOCIACIÓN CHINCHINÁ	montaña, vertientes, relieve ligeramente ondulado a fuertemente quebrado, pendientes cortas y moderadas, medio húmedo y muy húmedo, depósitos espesos de cenizas volcánicas, erosión en escurrimientos difusos y desprendimientos, muy profundos, bien drenados, texturas franco arenosas, ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, moderada, zonas de aptitud forestal comercial sin restricciones, Chinchiná, typic dystrandep, pc-5, 85, Vle
Clde	ASOCIACIÓN CHINCHINÁ - AZUFRADO	montaña, vertientes, relieve fuertemente quebrado a escarpado, algunos sectores de relieve quebrado, pendientes largas y empinadas, medio húmedo y muy húmedo, depósitos espesos de cenizas volcánicas y piedras metamórficas, erosión en escurrimientos difusos, desprendimientos y deslizamientos, profundos a superficiales, bien a excesivamente drenados, texturas variables, ligeramente ácidos a muy ácidos, contenidos altos a regulares de materia orgánica, moderada, zona de aptitud forestal productora-protectora, Chinchiná - azufrado - el cedral, typic dystrandep - typic troporhent - typic hapludoll, pc-5 - pc-15 - c-112, 40 - 30 - 30, Vles2
Slef1	CONSOCIACIÓN SANTA ISABEL	montaña, vertientes, relieve ligeramente ondulado a fuertemente quebrado y escarpado, pendientes cortas y largas, frío húmedo y muy húmedo, depósitos espesos de cenizas volcánicas, erosión en pata de vaca, deslizamientos y desprendimientos, profundos, bien drenados, texturas francas a franco arcillosas, ácidos a ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, baja, zonas de aptitud forestal comercial con restricciones menores, Santa Isabel, hydric dystrandep, pc-4 - pc-9, 80, Vllecl
Clcd	CONSOCIACIÓN CHINCHINÁ	montaña, vertientes, relieve ligeramente ondulado a fuertemente quebrado, pendientes cortas y moderadas, medio húmedo y muy húmedo, depósitos espesos de cenizas volcánicas, erosión en escurrimientos difusos y desprendimientos, muy profundos, bien drenados, texturas franco arenosas, ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, moderada, zonas de aptitud forestal comercial sin restricciones, Chinchiná, typic dystrandep, pc-5, 85, IVe

CONVENCION	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Clbc	CONSOCIACIÓN CHINCHINÁ	montaña, vertientes, relieve ligeramente ondulado a fuertemente quebrado, pendientes cortas y moderadas, medio húmedo y muy húmedo, depósitos espesos de cenizas volcánicas, erosión en escurrimientos difusos y desprendimientos, muy profundos, bien drenados, texturas franco arenosas, ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, moderada, zonas de aptitud forestal comercial sin restricciones, Chinchiná, typic dystrandept, pc-5, 85, Ille

POMCA – Adaptación propia

A continuación, se presenta una descripción general de las unidades de suelo cartografiadas de acuerdo al estudio de suelos semidetallado para la zona de estudio (IGAC & CORPOCALDAS, 2013)

Asociación CHINCHINÁ – AZUFRADO (CL): Esta unidad cartográfica se encuentra en altitudes que oscilan entre los 1200 y 2000 msnm, el relieve es de pendiente fuerte a escarpado y oscilan entre 25 – 75 % afectadas por erosión ligera y por deslizamientos localizados. Se presentan en vertientes de montaña y se componen a partir de las cenizas volcánicas, se caracterizan por ser profundos, bien drenados, de colores negros en superficie y pardo amarillento verdoso en profundidad. Las texturas identificadas corresponden a suelos finos de consistencia friable.

Consociación CHINCHINÁ: Corresponde a una unidad ubicada en la zona de piedemonte, formada por grandes depósitos de rocas ígneas y metamórficas recubiertas por mantos de cenizas volcánicas que han suavizado el relieve. Las pendientes tienen valores entre 3 – 25%, la erosión se identifica como de ligera a moderada y la altitud oscila entre 1500 y 1800 msnm. Se caracteriza por su color negro en los horizontes superiores y pardo amarillento en profundidad. Son suelos bastante fértiles sobre los que se cultiva principalmente café y productos de pan coger.

Consociación SANTA ISABEL: Son suelos que se ubican entre los 2.000 – 3.000 msnm, formando un relieve suavizado por la cobertura de cenizas volcánicas con una variación en pendiente de ligeramente ondulado hasta fuertemente escarpado, con valores entre 12 – 50 %. Son suelos de color gris oscuro a pardo en los primeros horizontes y amarillo pardo

en los horizontes inferiores, predominantemente la textura de las capas superiores es fina sobre texturas más gruesas en profundidad.

El resultado del análisis mediante pesos de evidencia se presenta en la Figura 5-15. La clase de mayor peso de evidencia corresponde a la clase CLde, teniendo apenas un 8.7% del total del área de la cuenca.

Tabla 5-15. Resultado del análisis de pesos de evidencia para la clasificación de suelo agrológico.

ID	SUELO	MOV	%MOV	CLASE	%CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	wi+	wi-	wf
1	Clbc	69	1.7%	24960	10.1%	69	4014	24891	219286	-1.797	0.090	-1.888
2	Clcd	0	0.0%	1171	0.5%	0	4083	1171	243006	0.000	0.005	-0.005
3	Clde	66	1.6%	13771	5.5%	66	4017	13705	230472	-1.245	0.041	-1.286
4	CLde	769	18.8%	21524	8.7%	769	3314	20755	223422	0.796	-0.120	0.915
5	CLef1	2989	73.2%	176588	71.1%	2989	1094	173599	70578	0.029	-0.076	0.105
6	Manizales	0	0.0%	1030	0.4%	0	4083	1030	243147	0.000	0.004	-0.004
7	Slef1	190	4.7%	9216	3.7%	190	3893	9026	235151	0.230	-0.010	0.240

5.5 Susceptibilidad a movimientos en masa de la cuenca

En esta sección se presenta la evaluación de la incidencia de cada uno de los factores condicionantes en la susceptibilidad del terreno ante procesos de remoción en masa. Se realiza un análisis de pesos finales de cada factor y otro teniendo en cuenta la combinación de factores, a partir de los análisis de pesos de evidencia presentados anteriormente.

5.5.1 Análisis de pesos de evidencia individuales para cada factor condicionante

El análisis se realiza con los pesos finales de cada clase de cada factor. En la Tabla 5-16 se presentan ordenadamente los pesos finales del mayor al menor de cada clase de todos los factores condicionantes desarrollados para la cuenca.

Tabla 5-16. Pesos de evidencia de mayor a menor para cada clase de todos los factores.

ID	FACTOR CONDICIONANTE	VALOR	Wf
1	USO SUELO	Tierras desnudas y degradadas.	1.147
2	PENDIENTE (°)	35 - 55	1.146
3	SUELO AGR.	CLde	0.915
4	ASPECTO	OESTE	0.700
5	GEOLOGÍA	KSC	0.685
6	CURVATURA	-4.1295 - -0.347	0.547
7	CAMBIO COBERTURA	Ganancia	0.512
8	ASPECTO	SUR-OESTE	0.456
9	ASPECTO	NOR-OESTE	0.305
10	CURVATURA	-0.3469 - -0.1509	0.242
11	SUELO AGR.	Slcf1	0.240
12	CURVATURA	0.3535 - 3.0151	0.233
13	SUELO AGR.	CLcf1	0.105
14	PENDIENTE (°)	16 - 35	0.079
15	PENDIENTE (°)	2 - 4	-0.004
16	SUELO AGR.	Manizales	-0.004
17	SUELO AGR.	Clcd	-0.005
18	ASPECTO	PLANO	-0.012
19	PENDIENTE (°)	0 - 2	-0.014
20	CAMBIO COBERTURA	Perdida	-0.031
21	CURVATURA	0.0453 - 0.1853	-0.043
22	USO SUELO	Bosques Seminatural	-0.093
23	GEOLOGÍA	QFL	-0.223
24	CURVATURA	-0.1508 - -0.0389	-0.241
25	CURVATURA	-0.0388 - 0.0452	-0.376
26	ASPECTO	SUR	-0.481
27	CURVATURA	0.1854 - 0.3534	-0.600
28	USO SUELO	Cultivos permanentes	-0.612
29	PENDIENTE (°)	8 - 16	-0.659
30	USO SUELO	Pastos	-0.666
31	ASPECTO	NORTE	-0.703
32	USO SUELO	Zonas urbanizadas	-0.708
33	CAMBIO COBERTURA	Persistencia	-0.883
34	ASPECTO	NOR-ESTE	-0.889

ID	FACTOR CONDICIONANTE	VALOR	Wf
35	GEOLOGÍA	KIEA	-0.913
36	PENDIENTE (°)	4 - 8	-0.927
37	GEOLOGÍA	KDG	-1.138
38	ASPECTO	SUR-ESTE	-1.249
39	SUELO AGR.	Clde	-1.286
40	GEOLOGÍA	PES	-1.496
41	ASPECTO	ESTE	-1.633
42	GEOLOGÍA	KVC	-1.664
43	SUELO AGR.	Clbc	-1.888

Elaboración propia

En la tabla se presentan 43 valores de pesos de evidencia de las clases de todos los factores desarrollados. Se puede observar que cada factor tiene una clase que representa de mejor manera la inestabilidad del terreno. Esto se observa en los 7 primeros pesos de evidencia que son clases de cada uno de los factores.

De la tabla se puede observar que los factores de morfometría presentados en la metodología ocupan 6 de los primeros 10 lugares del orden de mayor a menos peso de evidencia. Lo que da la idea de que estos factores propuestos pueden llegar a representar de buena manera las zonas inestables.

Las clases que menos representatividad tienen en la susceptibilidad a deslizamientos, son las que se encuentran en la parte baja de la cuenca y generalmente tienen poca extensión.

Como resultado para la cuenca de la quebrada El Rosario se obtiene que la mayor influencia en la ocurrencia de deslizamientos está representada por la clase *Sin Uso* del mapa de usos del suelo, seguida por la variable pendiente entre 35° y 55. Posteriormente la clase *CLde* del mapa de clasificación agrológica de suelos, luego la clase *Oeste* del mapa de aspecto y la clase de *KSC – Complejo Quebradagrande Miembro sedimentario* del mapa de geología, siendo los 5 valores más altos obtenidos de los análisis de pesos de evidencia.

5.5.2 Combinaciones de factores condicionantes (Índices de Susceptibilidad a Deslizamientos - LSI)

Para la determinación de la susceptibilidad no basta con analizar los factores individualmente, pues los procesos de remoción en masa son eventos complejos en los intervienen muchas variables sin saber con exactitud su grado de influencia.

Para ponderar una condición de susceptibilidad mayor se realiza la combinación de factores, a lo que se denomina índices de susceptibilidad a deslizamientos (LSI). La combinación de factores se realiza a partir de la suma de los pesos finales de cada una de las clases para cada píxel en el área de análisis. En la siguiente ecuación se presenta el cálculo para los índices de susceptibilidad a deslizamientos (LSI).

$$LSI_{pixel} = W_f Pendiente + W_f Curvatura + W_f UGS + W_f Cambio Cobertura + W_f Uso del Suelo + \dots + W_{fi} Variable_i$$

Para la cuenca de la quebrada El Rosario se realizaron 10 combinaciones con los 7 factores condicionantes definidos. Las combinaciones se realizaron teniendo en cuenta la significancia individual de cada factor analizada previamente. En la Tabla 5-17 se presentan las combinaciones realizadas. La primera corresponde a la combinación de todas las variables obtenidas.

Tabla 5-17. Combinaciones de factores realizada para la cuenca de estudio.

LSI	ASPECTO	CAMBIO COBERTURA	CURVATURA	GEOLOGÍA	PENDIENTE	SUELO AGRO	USO SUELO
1	X	X	X	X	X	X	X
2		X	X	X	X		X
3				X	X		X
4					X	X	X
5	X				X	X	X
6	X			X	X	X	X
7	X	X		X	X	X	X
8	X			X	X		X
9	X			X	X		
10	X		X	X	X	X	

En todas las combinaciones de LSI se utilizó como variable base la pendiente de las laderas, siendo una variable distribuida en toda la cuenca y obtenida a partir del modelo de elevación digital (DEM).

5.5.3 Análisis de los Índices de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) obtenidos

Para medir la bondad de representación de la susceptibilidad para cada LSI, se realizó la construcción de curvas de éxito, que relacionan las cantidades de píxeles inestables acumulados, respecto a los a las clases del LSI para toda la cuenca. Las clases para cada LSI, con las que se lleva a cabo la elaboración de las curvas de éxito corresponden a los percentiles unitarios de todos los datos de la cuenca. En la Figura 5-17, se presentan las curvas de éxito de todas las combinaciones de LSI obtenidas.

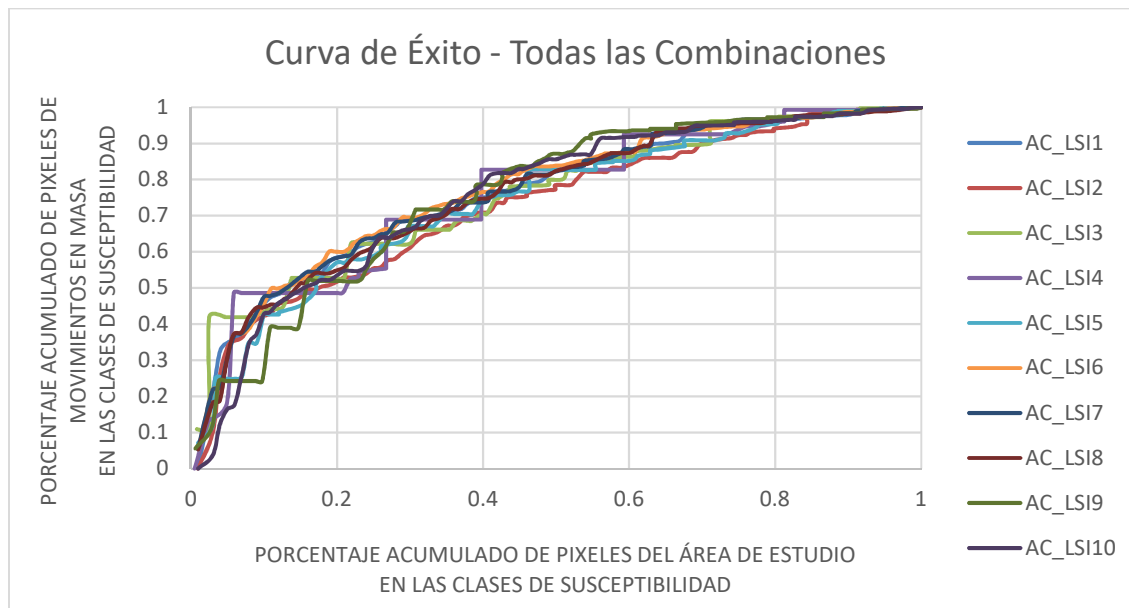


Figura 5-17. Curvas de éxito para todos los LSI obtenidos.

En la figura se pueden observar las pocas diferencias entre las curvas de éxito de cada una de las combinaciones de factores. Entre mayor sea la pendiente al inicio de la curva de éxito, mayor será el área bajo la curva, representando un mejor ajuste del índice (LSI).

El área bajo la curva para cada uno de los LSI obtenidos se presenta en la Tabla 5-18. De la tabla se puede observar que no existe gran diferencia en los valores de área bajo la curva que describe la bondad de representación del índice. El valor de la desviación estándar es bajo y representa similitud en los datos.

Tabla 5-18. Bondad de representación para cada LSI calculado

ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDA A DESLIZAMIENTOS	ÁREA BAJO CURVA (BONDAD REPRESENTACIÓN)
LSI 1	76.7%
LSI 2	73.1%
LSI 3	75.8%
LSI 4	76.0%
LSI 5	74.5%
LSI 6	77.6%
LSI 7	77.0%
LSI 8	76.4%
LSI 9	76.2%
LSI 10	76.0%
PROMEDIO	75.9%
MÁXIMO	77.6%
MÍNIMO	73.1%
DESV. ESTANDAR	0.013

Con el fin escoger el índice de susceptibilidad que mejor represente la condición de estabilidad de la cuenca, se propone que el LSI seleccionado será el de mayor área bajo la curva, pero validado espacialmente con criterio técnico respecto a la historia de la cuenca y del conocimiento de la zona.

En las siguientes figuras se presentan los mapas susceptibilidad a movimientos en masa obtenidos para cada uno de los índices de susceptibilidad (LSI) (ver Figura 5-18 y Figura 5-199. Los mapas de susceptibilidad están categorizados en susceptibilidad alta, media y baja de acuerdo a lo obtenido en los análisis de curva de éxito.

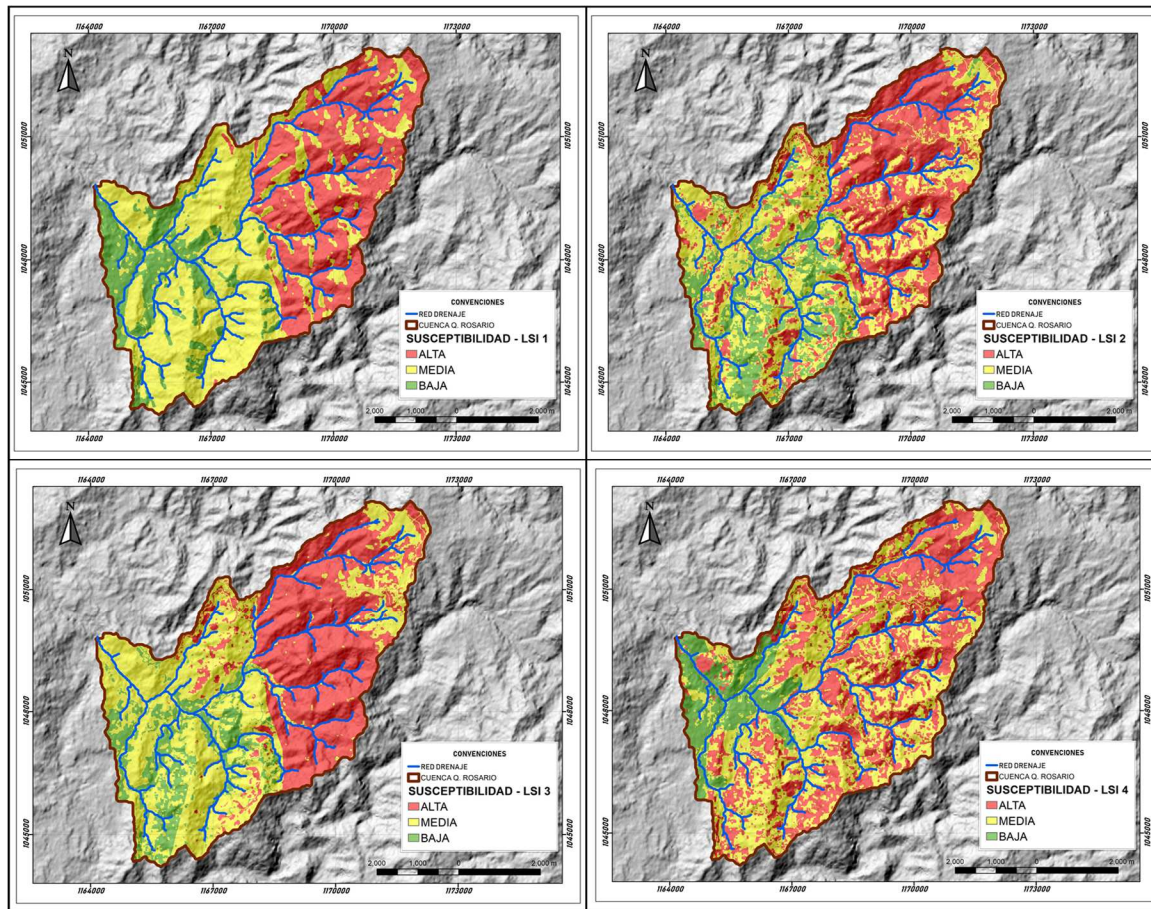


Figura 5-18. Mapas de susceptibilidad de acuerdo a los índices de susceptibilidad obtenidos. LSI 1 (superior izquierda), LSI 2 (superior derecha), LSI 3 (inferior izquierda), LSI 4 (inferior derecha).

De las figuras se puede observar que aunque los valores de área bajo la curva son similares entre LSI, visualmente los mapas son diferentes. En los mapas se puede observar como algunas clases de las variables controlan la distribución de la susceptibilidad de acuerdo al su peso de evidencia final. Por ejemplo, la clase Ksc del factor geología es la que controla la alta susceptibilidad ante procesos de remoción en masa en los mapas de LSI 1, LSI 2 y LS3, debido a que la mayoría de registros del inventario de deslizamientos se encuentran en dicha unidad geológica. Esta unidad se caracteriza por su buzamiento hacia el oeste, cubierto por una capa de material piroclástico de importante espesor, que es generalmente la capa de material que se desliza.

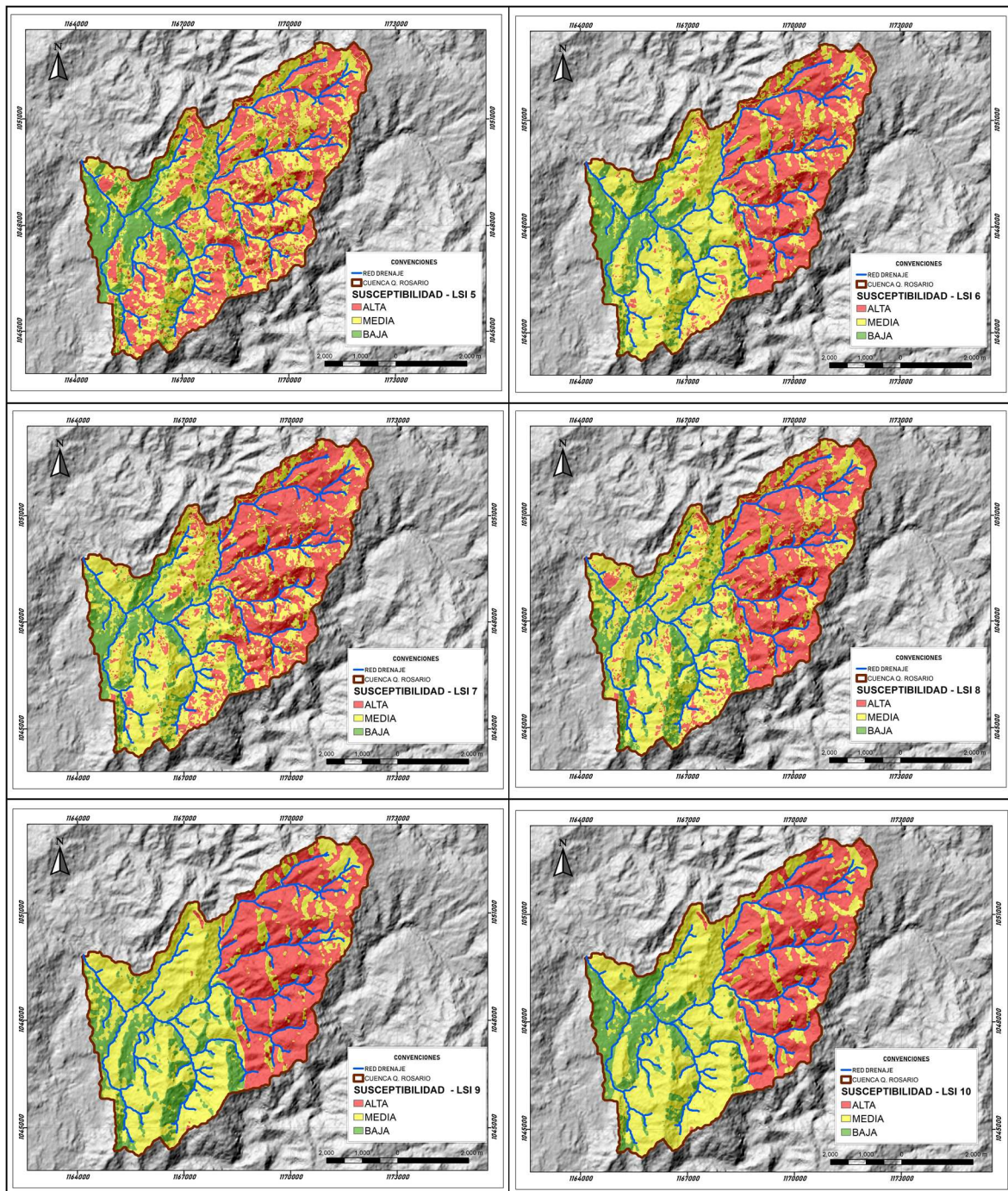


Figura 5-19. Mapas de susceptibilidad de acuerdo a los índices de susceptibilidad obtenidos. LSI 5 (superior izquierda), LSI 6 (superior derecha), LSI 7 (media izquierda), LSI 8 (media derecha), LSI 9 (inferior izquierda), LSI 10 (inferior derecha).

Para la cuenca de la quebrada El Rosario el Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) de la combinación de los factores aspecto, geología, pendiente, uso del suelo y la

clasificación agrológica de suelos, descritos como LSI 6 representa la mayor área bajo la curva.

5.5.4 Mapa de densidad de deslizamientos para la cuenca (Landslide Isopleth Maps)

A continuación, se presentan los resultados de la construcción del mapa de densidad de deslizamientos para la cuenca de la quebrada El Rosario. El tamaño de la malla utilizada corresponde a 250 m en el terreno. El radio de la circunferencia que define las áreas inestables aferentes corresponde al 75% de la distancia de la malla, es decir 187.5 m. En la Figura 5-20 se presenta el mapa de densidad de deslizamiento para la cuenca.

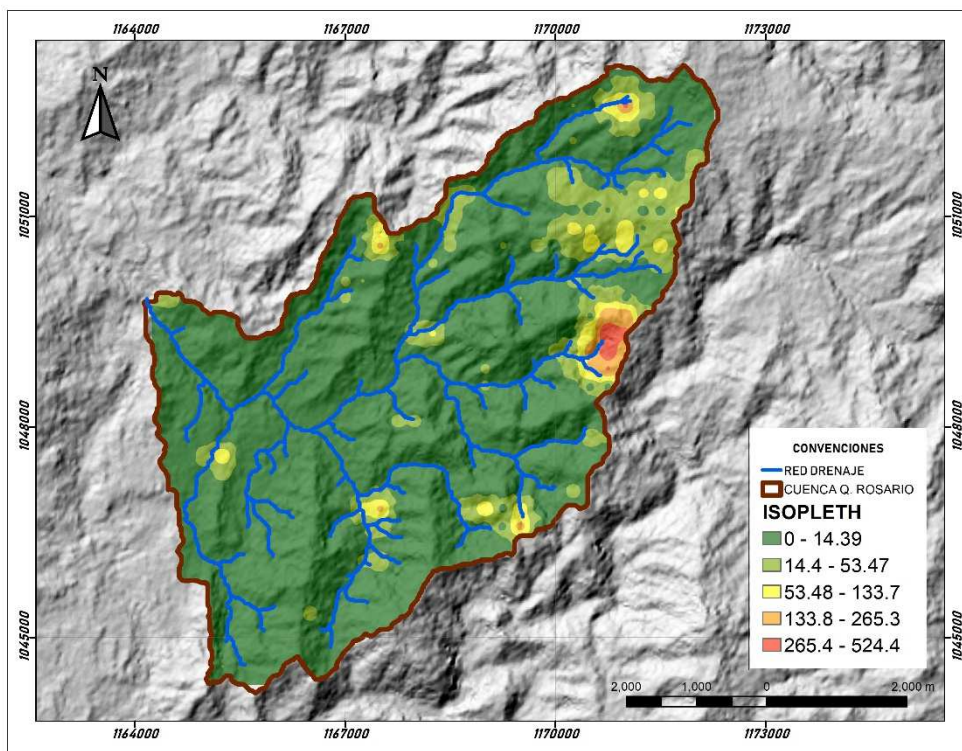


Figura 5-20. Mapa de densidad de deslizamientos, mediante el método de interpolación IDW.

El método de interpolación utilizado corresponde a Inverse Distance Weighting (IDW), clasificado en 5 clases de acuerdo a la clasificación mediante Natural Break (Jenks), realizada para la categorización de la densidad de deslizamiento.

El mapa de densidad de deslizamientos describe la densidad de áreas inestables de acuerdo a contornos de igual densidad. En la Figura 5-21 se presenta un detalle de las curvas que representan similar densidad de deslizamientos.

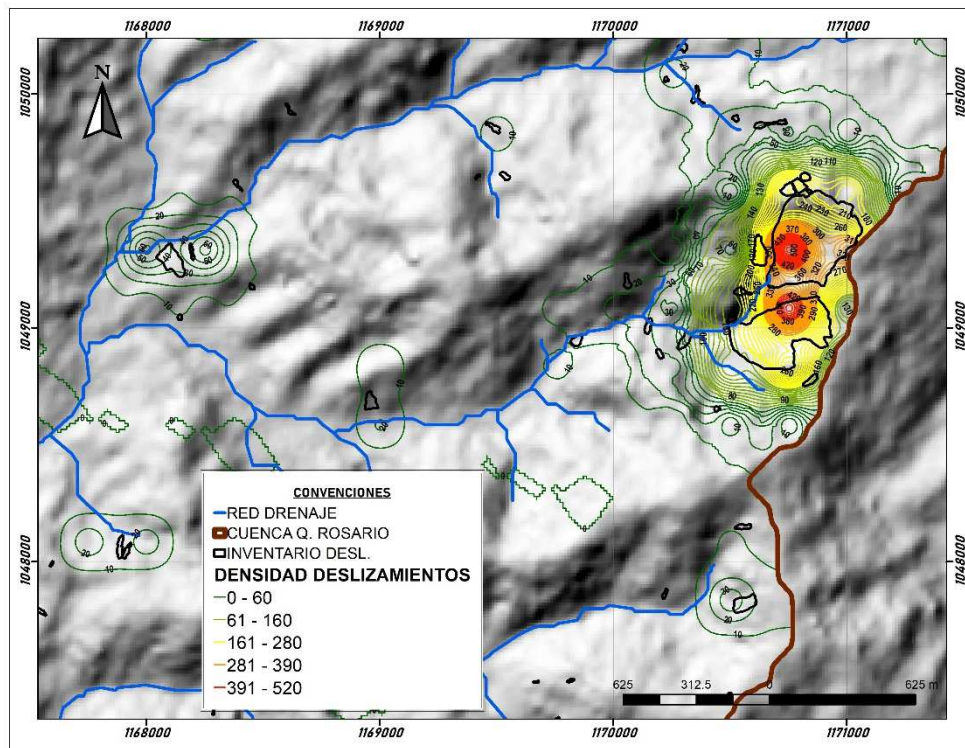


Figura 5-21. Detalle del mapa de densidad de deslizamiento para la cuenca en estudio.

Elaboración propia

De la figura se puede observar el detalle del mapa de densidad de deslizamientos para la zona de la cárcava de El Tablazo. El inventario de deslizamientos se presenta como polígonos con borde negro. Los contornos en color rojo representan la mayor inestabilidad siendo puntos que se ubican precisamente sobre la cárcava.

Visualmente se comparó el mapa de densidad de deslizamientos con los mapas de susceptibilidad definidos para cada LSI. En la Figura 5-22 se presenta para una misma

zona, el mapa de densidad de deslizamientos en contornos de igual densidad y los diferentes valores de LSI.

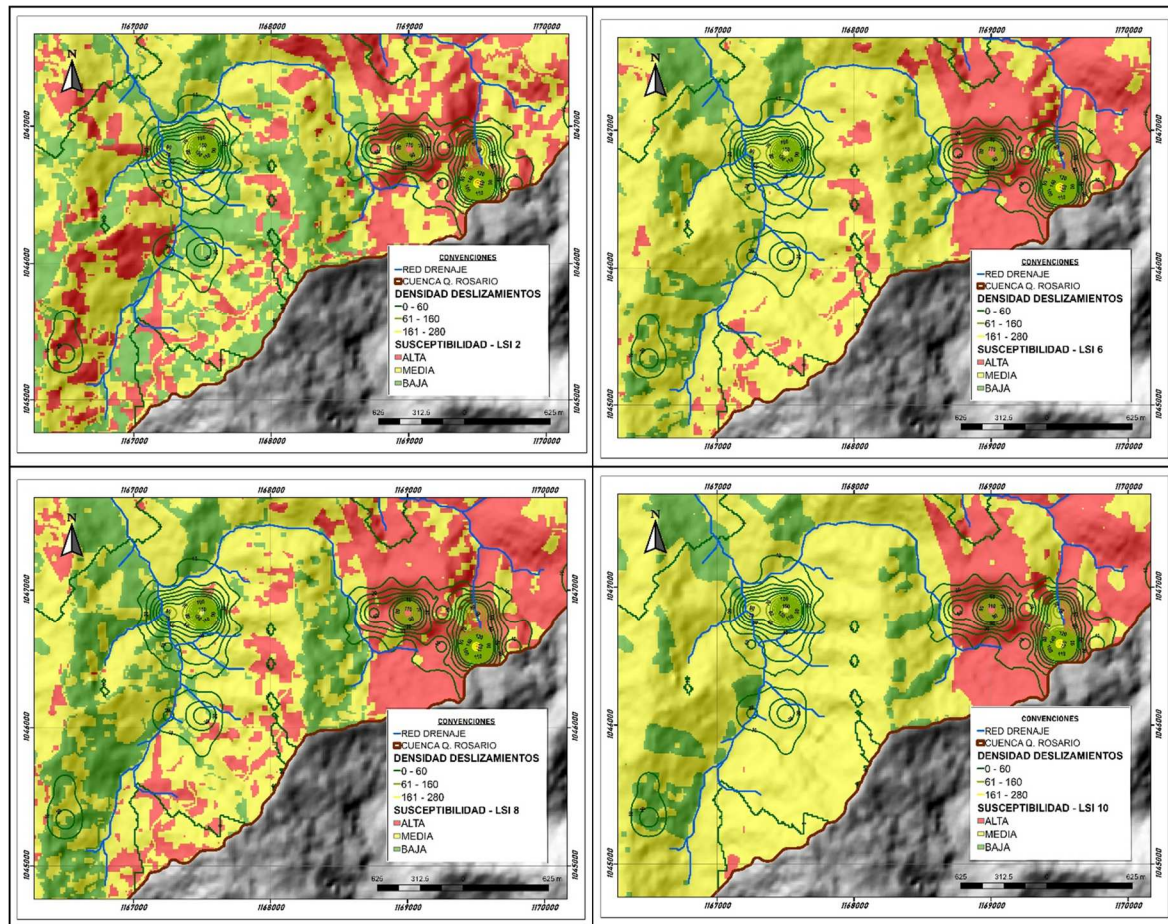


Figura 5-22. Comparación entre los mapas de densidad de deslizamientos y los mapas de susceptibilidad. LSI 2 (superior izquierda), LSI 6 (superior derecha), LSI 8 (inferior izquierda), LSI 10 (inferior derecha).

Para conocer el grado de representación del mapa de densidad de deslizamientos respecto a los mapas de índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) se realizó el análisis mediante curvas de éxito utilizadas para estimar la bondad de representación de las variables. En la Figura 5-23 se presenta la comparación de las curvas de éxito entre los LSI y las clases de percentiles individuales acumuladas para el mapa de densidad de deslizamientos.

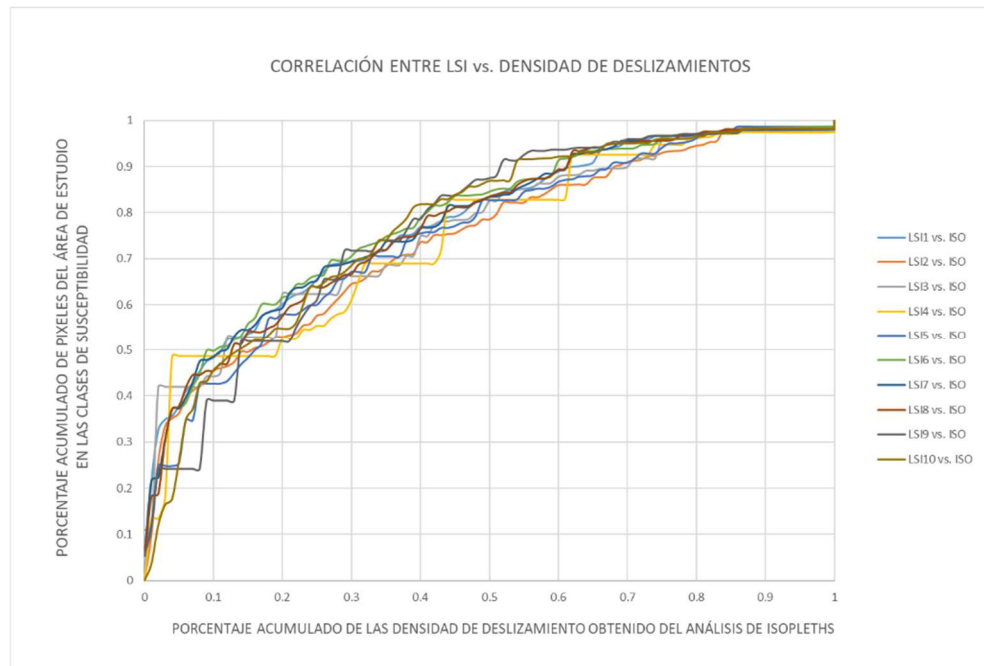


Figura 5-23. Comparación entre los valores de LSI, respecto al mapa de densidad de deslizamientos.

Para precisar el grado de correlación de las dos variables analizadas se realizó el ajuste de una línea de tendencia parabólica, la cual se presenta para cada LSI en la Tabla 5-19.

Tabla 5-19. Coeficiente de correlación R para la parábola de tendencia ajustada.

ID	ECUACIÓN	R
LSI1	$y = -0.8005x^2 + 1.476x + 0.307$	$R^2 = 0.9675$
LSI2	$y = -0.6934x^2 + 1.4128x + 0.2667$	$R^2 = 0.9715$
LSI3	$y = -0.6503x^2 + 1.3217x + 0.3184$	$R^2 = 0.9673$
LSI4	$y = -0.7166x^2 + 1.438x + 0.2694$	$R^2 = 0.9391$
LSI5	$y = -0.8416x^2 + 1.578x + 0.2431$	$R^2 = 0.979$
LSI6	$y = -0.8844x^2 + 1.5555x + 0.3039$	$R^2 = 0.9691$
LSI7	$y = -0.8313x^2 + 1.5116x + 0.3019$	$R^2 = 0.971$
LSI8	$y = -0.8788x^2 + 1.5811x + 0.2771$	$R^2 = 0.9767$
LSI9	$y = -1.2241x^2 + 2.0127x + 0.1745$	$R^2 = 0.9836$
LSI10	$y = -1.1655x^2 + 1.9283x + 0.1995$	$R^2 = 0.9669$

Los valores del parámetro de correlación R están en todos los casos por encima del 95%, lo que significa una alta representación de la parábola para las variables definidas

existiendo una proporción entre las dos. Lo brinda la idea de que existe una relación directa entre los índices de susceptibilidad a deslizamientos y la distribución espacial del mapa de densidad de deslizamientos, dándole soporte a la utilización del mapa de densidad de deslizamiento como variable de calibración del modelo de susceptibilidad utilizado.

5.5.5 Mapa de susceptibilidad para la cuenca de la quebrada El Rosario

Para la cuenca de estudio y de acuerdo a los criterios de selección de alternativas de LSI descritos, se define el mapa de susceptibilidad como el LSI 6, que cuenta con un valor de ajuste del 77.6 % del análisis de curva de éxito. En la Figura 5-24, se presenta el mapa de susceptibilidad para la cuenca de estudio.

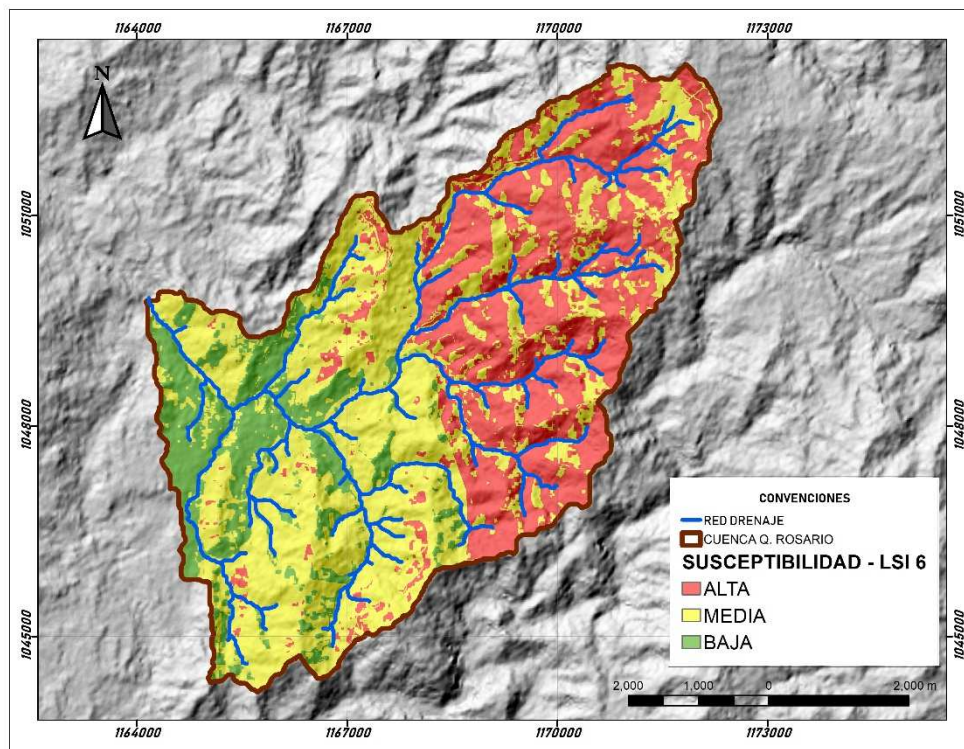


Figura 5-24. Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa definido para la cuenca de estudio a partir del LSI 6.

En el mapa LSI-6 se pueden observar los contactos de la geología bien definidos, separando de manera general en dos partes la cuenca. A la derecha se observan áreas

de susceptibilidad media a alta, correspondiente a la parte alta de la cuenca, mientras que en la parte izquierda, se observa un color amarillo y verde que representa zonas de susceptibilidad media a baja.

5.6 Modelación de respuesta hidrológica como detonante de la amenaza por procesos de remoción en masa

A continuación, se presenta lo referente a la influencia de la precipitación para la cuenca de estudio en la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Principalmente la distribución espacial del Déficit de Humedad del Suelo (SDM) del modelo hidrológico TOPMODEL.

5.6.1 Información hidroclimatológica para la cuenca de la Quebrada El Rosario

La cuenca de estudio se ubica en la zona rural del municipio de Manizales y cuenta con una importante red meteorológica cercana. En la Figura 5-25 se presentan las estaciones de recolección de datos hidroclimatológicos que tienen influencia en la cuenca de estudio. En la figura se observan 16 estaciones aferentes al sitio de estudio, algunas corresponden a estaciones de tipo pluviométricas, hidrometeorológicas y principales. La mayoría de las estaciones se ubican en la parte alta de la cuenca más cercanas a perímetro urbano de Manizales. En la Tabla 5-20 se presentan algunas características de las estaciones presentadas.

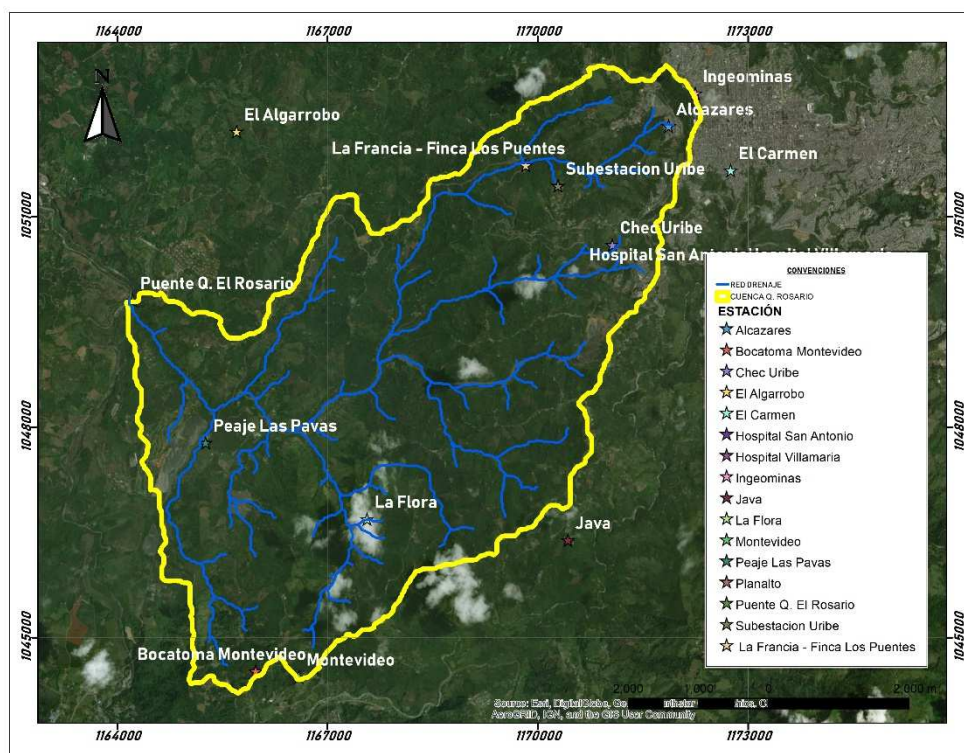


Figura 5-25. Estaciones hidroclimatológicas para la cuenca de estudio.

Tabla 5-20. Características de las estaciones con influencia a la cuenca en estudio.

ID	Estacion	Entidad	Tipo	Altitud	Latitud	Longitud	Años_Reg	Escala
1	La Francia - Finca Los Puentes	CORPOCALDAS	Hidrometeorológica	1620	5.062	-75.546	3	5 minutos
2	Peaje Las Pavas	CORPOCALDAS	Hidrometeorológica	1250	5.027	-75.587	3	5 minutos
3	Puente Q. El Rosario	CORPOCALDAS	Hidrometeorológica	1131	5.045	-75.597	3	5 minutos
4	Hospital San Antonio	CORPOCALDAS	Meteorológica	1790	5.048	-75.519	7	5 minutos
5	Cenicafe	Cenicafe	Principal	1590	4.983	-75.600	54	Horaria
6	Planalto	Cenicafe	Principal	1413	4.990	-75.590	21	Horaria
7	Java	Cenicafe	Pluviométrica	1778	5.014	-75.541	34	Diaria
8	La Flora	Cenicafe	Pluviométrica	1581	5.017	-75.567	7	Diaria
9	La Margarita	Cenicafe	Pluviométrica	1436	5.033	-75.610	7	Diaria
10	El Algarrobo	Cenicafe	Principal	1202	5.067	-75.583	12	Mensual
11	Montevideo	CHEC	Pluviométrica	1370	4.996	-75.576	52	Diaria
12	Subestacion Uribe	CHEC	Pluviométrica	1905	5.060	-75.542	37	Diaria
13	Bocatoma Montevideo	CHEC	Hidrometeorológica	1391	4.997	-75.581	5	5 minutos
14	Chec Uribe	IDEA	Principal	1940	5.052	-75.535	0	5 minutos
15	El Carmen	IDEA	Principal	2112	5.062	-75.520	6	5 minutos
16	Alcazares	IDEA	Principal	2057	5.067	-75.528	2	5 minutos
17	Ingeominas	IDEA	Principal	2226	5.071	-75.524	7	5 minutos

Elaboración propia

La mayoría de las estaciones presentadas pueden ser consultadas en la plataforma web del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia –

Sede Manizales. Otras estaciones son propiedad de empresas privadas como Genicafé, las cuales fueron utilizadas en los documentos técnicos del POMCA del río de Chinchiná.

Aunque se encuentran múltiples estaciones con información de precipitación, para el presente trabajo se utiliza una única estación con el fin de evaluar el comportamiento de agua respecto a las variaciones topográficas que afectan la condición de flujo en el terreno.

La estación utilizada para los análisis de respuesta hidrológica es la estación de Alcázares ubicada en la parte alta de la cuenca. Esta estación es seleccionada debido a que es una estación principal, en la que se registran las variables requeridas para la entrada al modelo hidrológico TOPMODEL (precipitación y evapotranspiración). El periodo utilizado para el análisis corresponde a un año completo de registro de información (2014). En la Figura 5-26 se presenta la serie de precipitación y evapotranspiración del año 2014.

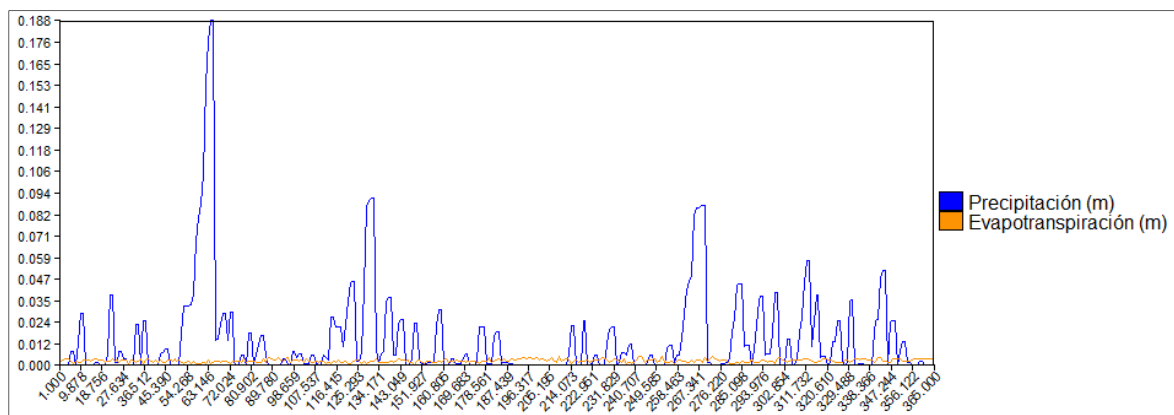


Figura 5-26. Serie de precipitación y evapotranspiración para el año 2014 de la estación principal Alcázares.

De la figura se puede observar un evento excepcional en el primer trimestre del año 2014, de 188 mm de precipitación aproximadamente. Observando la serie se marca el comportamiento bimodal de la precipitación típico de la ubicación de la zona de estudio. Por otra parte, la evapotranspiración se puede observar casi constante a lo largo del año, su variación es debida a los cambios en las condiciones ambientales del sitio de estudio.

De acuerdo con lo presentado en la página del IDEA sobre las estaciones meteorológicas de la ciudad de Manizales, se puede observar que recientemente se ha colocado una estación hidrometeorológica en la desembocadura de la quebrada El Rosario en el río Cauca (2015). Aunque la estación registra la variación del nivel de la lámina de agua, no se encuentra calibrada, pues no se conoce la sección hidráulica, ni tampoco la velocidad promedio del flujo en este tramo de la corriente, por lo que no es posible obtener las variaciones de caudal para esa sección de acuerdo a la información registrada.

5.6.2 Aplicación del modelo hidrológico propuesto

A continuación, se presenta la aplicación del modelo TOPMODEL respecto a la influencia espacial del factor detonante precipitación y su efecto en los procesos de remoción en masa. Inicialmente se obtienen el mapa de Índice Topográfico de Humedad (TWI), que relaciona el área contributiva de flujo de la ladera para cada píxel de análisis. El mapa de TWI para la cuenca en estudio se presenta en la Figura 5-27.

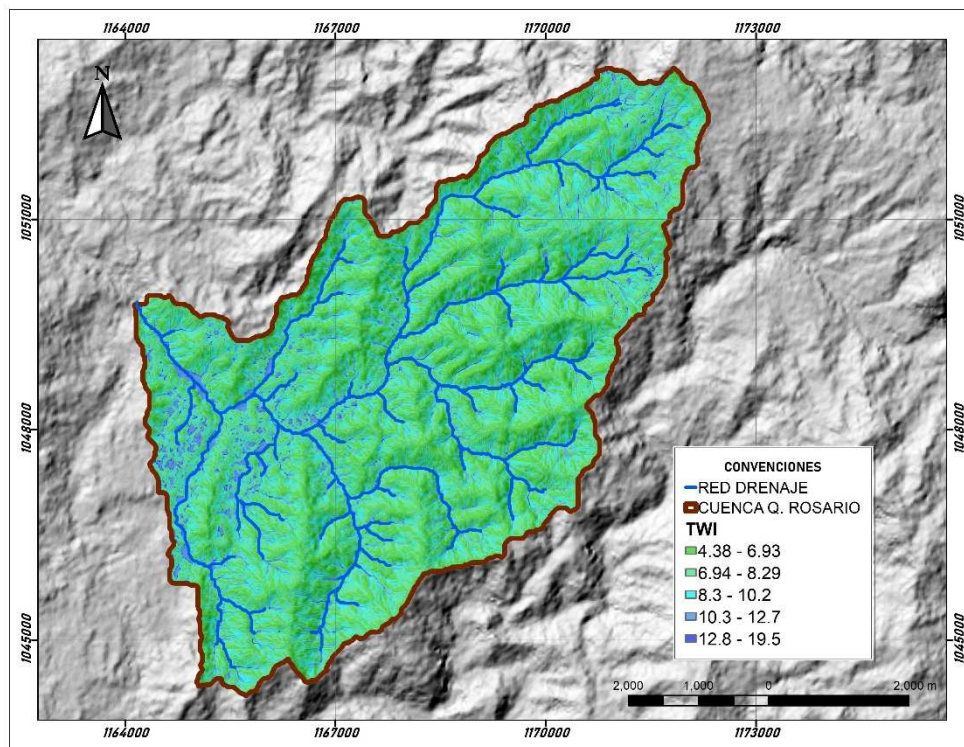


Figura 5-27. Mapa de Índice Topográfico de Humedad (TWI) para la cuenca de estudio.

En la figura se puede observar que el mapa de Índice de Topográfico de Humedad es consecuente con la lógica del proceso de flujo en las laderas. Se observa en azul los píxeles con mayor valor de índice correspondientes a las corrientes o zonas más bajas mientras que las zonas más verdes corresponden a las partes más altas con menos aporte de caudal.

En la Figura 5-28 se presenta un detalle del Índice Topográfico de Humedad (TWI), los valores menores corresponden a las zonas más verdes ubicadas en las partes altas de la cuenca, mientras que las zonas más azules corresponden a las corrientes de agua que se conforman el relieve.

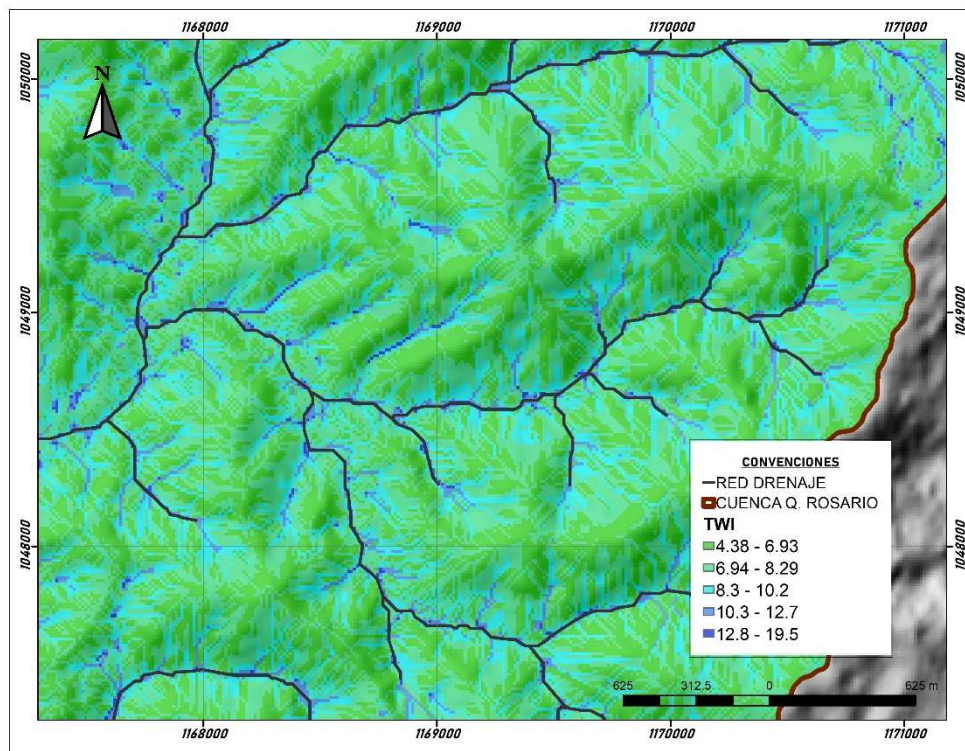


Figura 5-28. Vista detallada de la clasificación realizada para el TWI.

El modelo hidrológico TOPMODEL genera como resultados una tabla en la que se presentan los caudales y alturas de las diferentes variables del ciclo hidrológico

modeladas, junto con un mapa de Déficit de Humedad en el Suelo (SMD), que es obtenido a partir de la precipitación de entrada, el TWI y la permeabilidad de los materiales del suelo.

En el presente trabajo, se busca asociar la variabilidad espacial del agua en las laderas y su influencia en la ocurrencia de movimientos en masa. Debido a esto se consideran constantes la precipitación de entrada y la permeabilidad de los materiales para toda la cuenca, pudiendo con esto observar la influencia efectiva de la condición topográfica de las laderas.

El mapa de Déficit de Humedad del Suelo (SMD) es la utilizado para determinar la respuesta hidrológica de las laderas como detonante de inestabilidad, pues se asocia al nivel de aguas freáticas. El SMD representa a lo largo de la ladera el ascenso del nivel freático, que genera excesos de presión de poros causando el descenso de las fuerzas de resistencia de las laderas. En la Figura 5-29, se presenta un detalle del Déficit de Humedad del Suelo (SMD) para la cuenca de estudio teniendo en cuenta las consideraciones descritas anteriormente.

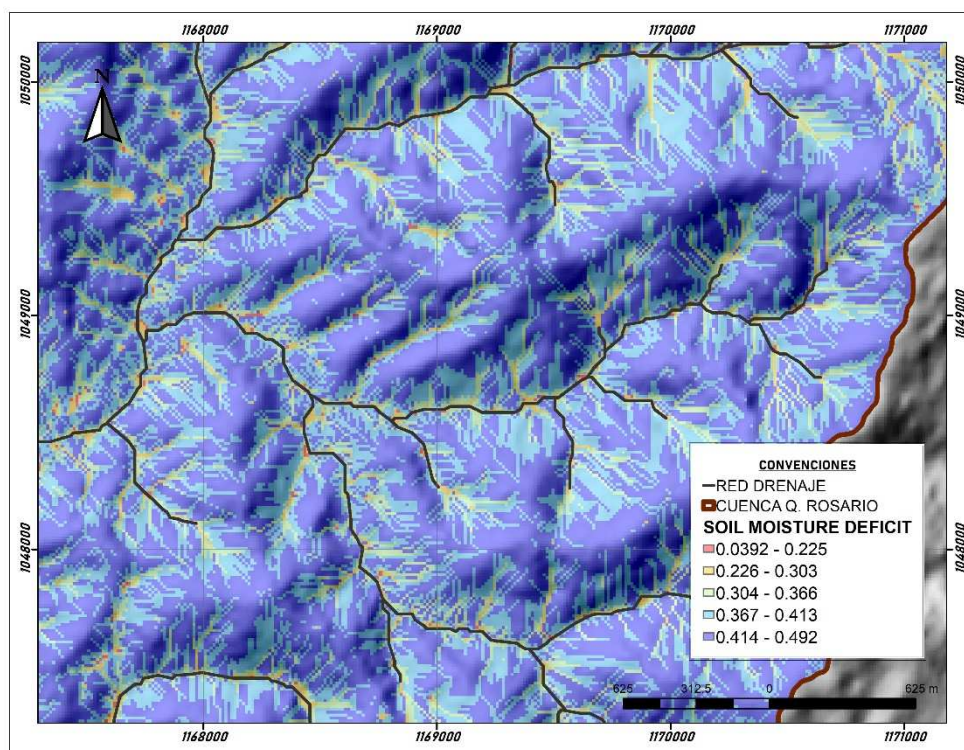


Figura 5-29. Vista detallada del mapa de Déficit de Humedad de Suelo.

En el mapa se puede observar que en las partes más altas existe un mayor déficit de humedad en el suelo representado una mayor profundidad a la que se encuentra el nivel freático, distinguida en el mapa en color azul oscuro, mientras que en las zonas más bajas se observan valores menores de SMD, es decir que el nivel freático se encuentra más cercano a la superficie.

Para entender la variabilidad del ascenso del déficit de humedad del suelo (SMD) asociados al nivel de aguas freáticas, se calculan diferentes escenarios de acuerdo a la magnitud de precipitación la estación principal Alcázares, presentada anteriormente. Se definen los valores de la precipitación para la modelación los correspondientes a los deciles de la serie de precipitación y el valor promedio para el año 2014. Los valores estadísticos básicos y el resumen de los análisis para cada uno de los SMD realizados se presenta en la Tabla 5-21.

Tabla 5-21. Influencia del cambio en la precipitación en el Déficit de Saturación del Suelo.

m	0.05	PRECIPITACIÓN (m)									
Tmax (m2/h)	1	0.0000	0.0004	0.0016	0.0044	0.0077	0.0150	0.0176	0.0244	0.0391	0.1882
ESTADÍSTICOS BÁSICOS		SMD 2	SMD 3	SMD 4	SMD 5	SMD 6	SMD 1	SMD 7	SMD 8	SMD 9	SMD 10
MAX		1.0849	0.4399	0.3706	0.3200	0.2919	0.2587	0.2506	0.2344	0.2108	0.1322
MIN		1.0471	0.4022	0.3328	0.2823	0.2541	0.2209	0.2128	0.1966	0.1731	0.0945
PROMEDIO		1.0557	0.4108	0.3415	0.2909	0.2628	0.2296	0.2215	0.2052	0.1817	0.1031
DESV. ESTANDAR		0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041

De la tabla se puede observar que los valores de déficit de saturación del suelo disminuyen a medida que aumenta la precipitación de entrada, lo que se asocia al aumento en el nivel freático de referencia cuando no hay precipitación, dando la idea adecuada de lo que quiere representar el modelo teniendo en cuenta las áreas contributivas aguas arriba.

De la tabla, para el SMD 2 con una precipitación de 0.0 mm, se obtiene como valor mayor de SMD entre todos los pixeles de la cuenca un valor de 1.08 m, mientras que para el SMD 5 con una lluvia de 4.4 mm se tiene un valor mayor de 0.32 m y el SMD 10 con la precipitación mayor en el año 2014 el valor de SMD es de 0.13 m, llegando casi a la saturación.

Debido a lo anterior se observa que en el comportamiento de las variables que la influencia de la precipitación es proporcional a la altura del nivel freático, siendo consecuente con los resultados esperados de la influencia de precipitación en la saturación de las laderas. Se puede observar que la variable principal que rige el modelo corresponde al índice topográfico de humedad descrito anteriormente.

5.6.3 Pesos de evidencia para el factor detonante de inestabilidad

A continuación, se presentan los análisis de pesos de evidencia de las dos variables Índice Topográfico de Humedad (TWI) y del Déficit de Humedad de Suelo (SMD) para el valor promedio de precipitación de la estación Alcázares y los parámetros de calibración (m) y de permeabilidad (T_{máx}) constantes.

▪ Índice Topográfico de Humedad

En la Tabla 5-22 se presenta el análisis de pesos de evidencia para el Índice Topográfico de Humedad (TWI). Se puede observar en los valores de los pesos finales (Wf), que no existe una variación importante entre los valores obtenidos en los rangos de análisis, lo que significa que la variable representa de manera regular la inestabilidad de la zona.

Tabla 5-22. Pesos de evidencia para la variable TWI de la cuenca en estudio.

ID	TWI	TWI_R_V0	MOV	%MOV	CLASE	%CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	wi+	wi-	wf
1	4.379 - 6.927	1	1311	32.11%	74803	30.13%	1311	2772	73492	170685	0.065	-0.029	0.094
2	6.927 - 8.290	2	1727	42.30%	103927	41.86%	1727	2356	102200	141977	0.011	-0.008	0.018
3	8.290 - 10.245	3	846	20.72%	48616	19.58%	846	3237	47770	196407	0.057	-0.014	0.072
4	10.245 - 12.675	4	173	4.24%	17451	7.03%	173	3910	17278	226899	-0.513	0.030	-0.543
5	12.675 - 19.489	5	26	0.64%	3463	1.39%	26	4057	3437	240740	-0.793	0.008	-0.801

Aunque se puede observar que los tres primeros rangos de TWI tienen pesos finales positivos, que significan algún grado de representatividad de la variable. Los valores de TWI son inversamente proporcionales a su posición en la ladera, es decir, que los valores de TWI más bajos corresponden a la parte alta de la ladera, mientras que los valores mayores a la parte baja.

De la tabla anterior se puede observar que la clase 1 y 3 son las de mayor peso en la representación de la ocurrencia de movimientos en masa. Estas dos clases se encuentran en la zona media y alta de la ladera, siendo donde más ocurren procesos de remoción en masa.

▪ **Déficit de Humedad del Suelo**

En la Tabla 5-23, se presenta el análisis de pesos de evidencia para la variable Déficit de Humedad del Suelo (SMD) obtenido del valor de precipitación promedio de la serie analizada. En la tabla se puede observar 5 categorías del SMD con las que se realizó la evaluación de pesos de evidencia. A diferencia del TWI, los valores de los rangos de SMD son directamente proporcionales a su posición en la ladera, es decir que a menor valor de SMD los píxeles se encuentran en la parte más baja de la ladera, mientras que a mayor valor de SMD se encuentran en las partes más altas.

Tabla 5-23. Pesos de evidencia para la variable SMD de la cuenca en estudio.

ID	SMD	SMD_REC_V0	MOV	%MOV	CLASE	%CLASE	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	wi+	wi-	wf
1	0.039 - 0.225	1	15	0.37%	1575	0.63%	15	4068	1560	242617	-0.553	0.003	-0.556
2	0.225 - 0.303	2	88	2.16%	12925	5.21%	88	3995	12837	231340	-0.892	0.032	-0.924
3	0.303 - 0.365	3	492	12.05%	26471	10.66%	492	3591	25979	218198	0.124	-0.016	0.140
4	0.365 - 0.413	4	1373	33.63%	83236	33.53%	1373	2710	81863	162314	0.003	-0.002	0.005
5	0.413 - 0.491	5	2115	51.80%	124053	49.97%	2115	1968	121938	122239	0.037	-0.038	0.075

De la tabla se puede observar que la clase 3 es la que mejor representa las zonas inestables en un rango de SMD entre 0.303 a 0.365 m. Los análisis dan como resultado la idea de que la mayoría de zonas inestables causadas por efectos de la precipitación se encuentran en la parte media de las laderas y no en las zonas más altas de la cuenca.

5.6.4 Determinación de la influencia de las variables TWI y SMD en la representatividad de zonas inestables

Para determinar la bondad de representación de las variables analizadas en la modelación de respuesta hidrológica se realiza el análisis de curvas de éxito descrito anteriormente. En la Figura 5-30 se presentan las curvas de éxito para las dos variables obtenidas del modelo hidrológico.

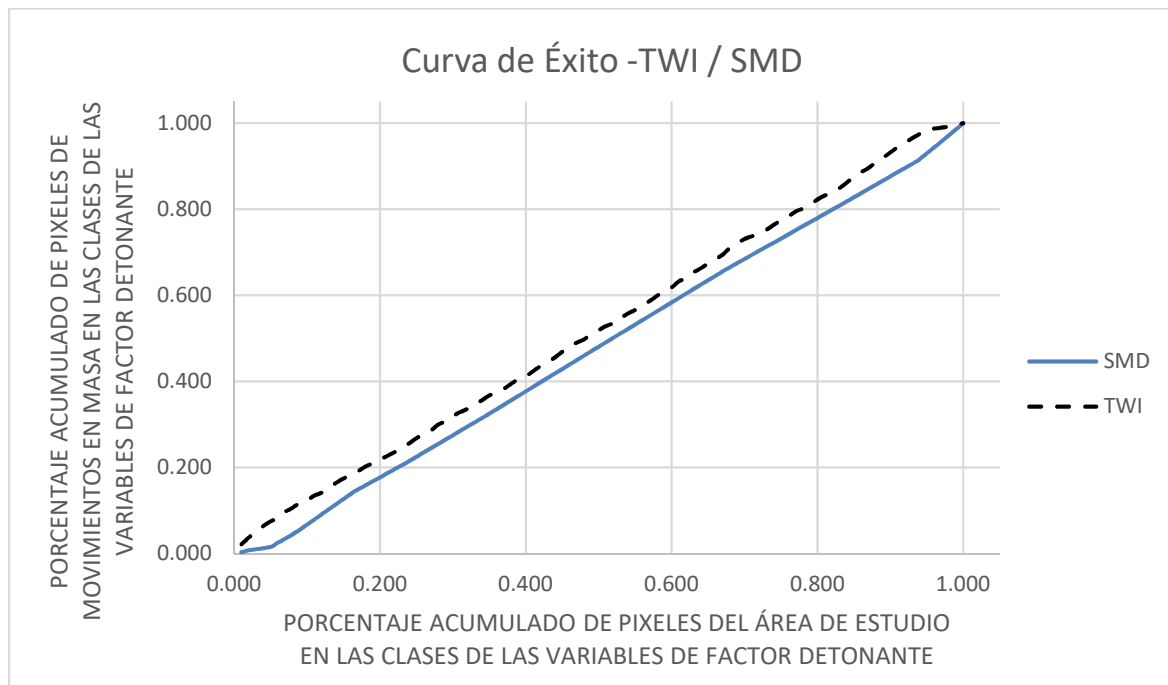


Figura 5-30. Curvas de éxito de las variables TWI y SMD del modelo hidrológico TOPMODEL.

En la figura anterior se puede observar que las curvas de éxito de las variables TWI y SMD son muy similares, pues el SMD se obtiene a partir del TWI, por lo que se observa una pendiente casi constante. Esta tendencia es debida a que en todas las clases percentiles existe una proporción de píxeles identificados como áreas inestables en el inventario de movimientos en masa.

El área bajo la curva para el TWI es de 53.5%, mientras que la de SMD es de 43.6%, siendo valores muy bajos para afirmar una adecuada bondad de ajuste de las variables en la descripción de zonas inestables.

Aunque individualmente las variables TWI y SMD no describen de la mejor forma la inestabilidad del terreno, se puede observar en los análisis de pesos de evidencia que la clasificación en rangos puede brindar una mejor interpretación de las variables las variables.

5.7 Evaluación de la amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca

Para la evaluación de la amenaza se combinan los pesos de evidencia finales del Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) con los pesos de las variables del factor detonante de inestabilidad TWI y SMD. El LSI utilizado para los análisis de amenaza corresponde a la combinación de factores número 6 (LSI - 6).

Con la combinación entre LSI y las variables del factor detonante se determina el Índice de Amenaza por Deslizamientos (LHI). Este índice se obtiene de la suma de los pesos de evidencia finales del LSI y los del TWI y SDM obtenidos anteriormente, como se presenta en los siguientes apartados.

5.7.1 Índices de Amenaza por Deslizamiento (LHI) para la cuenca

Los índices de amenaza por deslizamientos evaluados corresponden a las siguientes combinaciones, en términos de pesos de evidencia finales:

- **Índice de Amenaza por Deslizamientos A** = LSI 6 + TWI
- **Índice de Amenaza por Deslizamientos B** = LSI 6 + SMD

Una vez sumados los factores, se evalúa la bondad de cada índice mediante la construcción de curvas de éxito que definen la capacidad de representación de las áreas

inestables de acuerdo a los percentiles. Las dos curvas de éxito se presentan en la Figura 5-31.

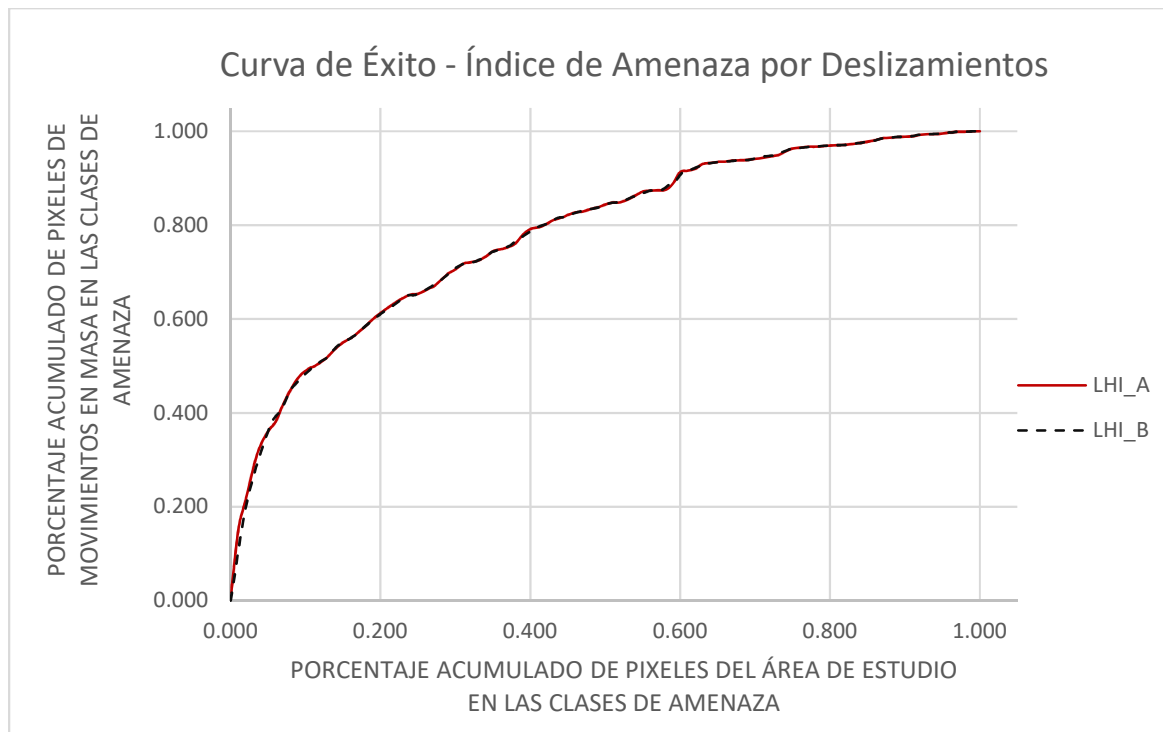


Figura 5-31. Curvas de éxito para los Índices de Amenaza por Deslizamiento (LHI).

De la figura se puede apreciar que las dos curvas de éxito construidas son prácticamente iguales. Las áreas bajo la curva son similares, siendo para el LHI_A de 78.8% y para el LHI_B de 79.1%. Debido a esto se utiliza el Índice Topográfico de Humedad (TWI) como el mapa que representa el factor detonante precipitación.

5.7.2 Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario

Como resultado de los análisis se definió un mapa de amenaza por movimientos en masa para la cuenca. El Índice de Amenaza por Deslizamientos utilizado corresponde al LHI_A, obtenido de la combinación del Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos 6 (LSI 6) y el Índice Topográfico de Humedad (TWI).

La clasificación en categorías de amenaza en alta, media y baja se realiza de acuerdo al porcentaje de píxeles acumulados de movimientos en masa en las clases de amenaza de la curva de éxito, así:

- Amenaza Alta = 0% -75%
- Amenaza Media = 75% - 95%
- Amenaza Baja = 95% - 100%

En la Figura 5-32 se presenta el mapa de amenaza por movimientos en masa clasificado y obtenido a partir el LHI A.

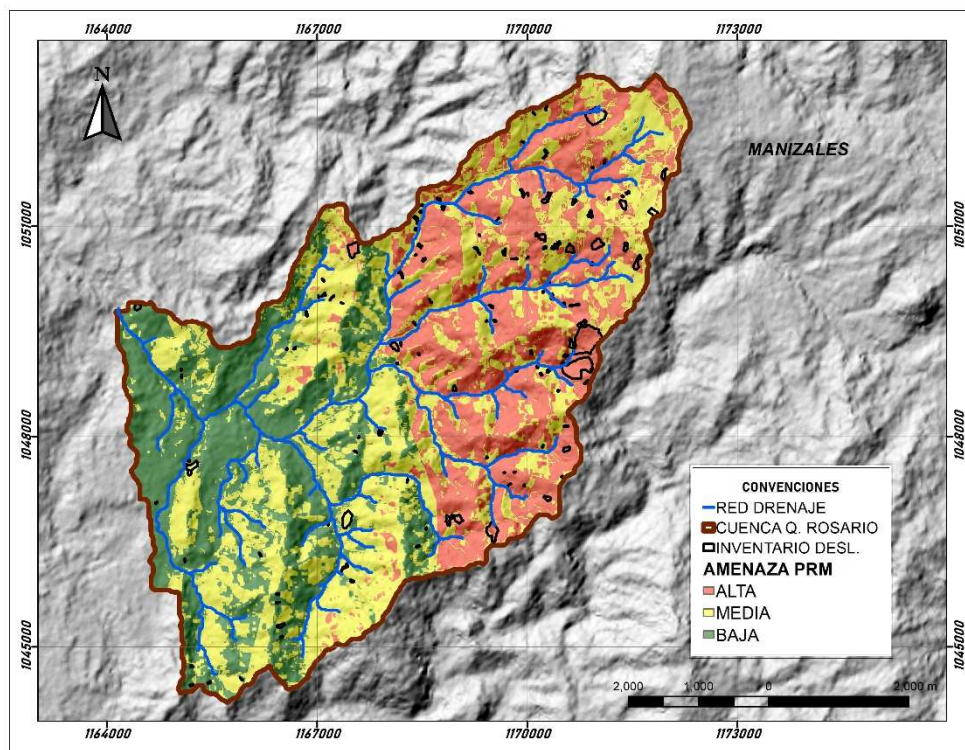


Figura 5-32. Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario, clasificado en amenaza alta media y baja. A partir del LHI A.

Del mapa se puede observar que las zonas de amenaza alta se ubican en la parte alta de la cuenca, debido a su pendiente y a la unidad geológica Complejo Quebradagrande Miembro Sedimentario (Ksc), en la que ocurren la mayoría de procesos y representa adecuadamente las áreas inestables. En la parte baja de la cuenca predomina una

clasificación de amenaza baja debida a su baja pendiente y a la ausencia de eventos registrados en el inventario. El mapa de amenaza por procesos de remoción en masa como un producto final se presenta en el Anexo D.

6. Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones se dividen para la metodología general y para los resultados obtenidos en la cuenca de la quebrada El Rosario, en donde se desarrolló la metodología. Las recomendaciones se presentan de manera general con el fin de sugerir mejoras en algunos temas presentados en el documento.

6.1 Conclusiones

6.1.1 Conclusiones generales de la metodología propuesta

La metodología para la elaboración de mapas de amenaza por procesos de remoción en masa propuesta en el presente documento se considera adecuada respecto a resultados finales de los mapas de amenaza, pues describe la recolección y análisis de la información necesaria para la elaboración de los mapas. La metodología promueve la utilización de herramientas de acceso libre que permiten llevar a cabo análisis adecuados y a bajos costos. En la metodología se desarrollan principalmente los aspectos de recolección de información y geoprocusamiento usando sistemas de información geográfica (SIG).

Para el levantamiento del inventario de movimientos en masa, la metodología propuesta permite la identificación, clasificación, representación, sistematización y almacenamiento de los procesos de remoción en masa, identificados en los trabajos de análisis visual de imágenes, permitiendo crear una perspectiva para el trabajo de campo y siendo la base para los estudios de amenaza por movimientos en masa. Para la construcción del inventario se presentan propuestas en el análisis visual de imágenes y para la recolección de información en campo. De la calidad espacial y temporal del inventario de deslizamientos, junto con la representación adecuada de los factores condicionantes y detonantes, depende la calidad de los mapas de amenaza por procesos de remoción en masa finales.

La aplicación móvil LandSlide Collector desarrollada para la optimización de recolección de información, es una herramienta muy útil para el levantamiento y caracterización de movimientos en masa en campo, pues permite la recopilación y almacenamiento de

información de un deslizamiento de manera óptima y precisa, siendo la portabilidad y la calidad de datos recolectados la principal ventaja respecto al formato análogo.

Los geoprocesamientos en SIG propuestos para el factor condicionante Morfometría (aspecto, pendiente y curvatura), permiten delimitar de manera precisa las laderas individuales del terreno, pudiendo acotar las áreas de análisis. Además, se describe una propuesta para ajustar el efecto pimienta de los elementos ráster.

El mapa de aspecto se considera como un factor relevante que permite identificar los límites precisos de las laderas individuales. Una dirección de ladera dominante puede estar asociada a la génesis de los materiales presentes, que se podrá usar en la construcción del mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS).

Los rangos propuestos para la clasificación de la pendiente, no representan adecuadamente la ocurrencia de movimientos en masa, debido a sus amplios límites que abarcan gran parte del área del inventario de deslizamientos.

La curvatura en planta efectivamente corresponde a un factor que aporta en la determinación de zonas susceptibles. Se construyó a partir de la propuesta de zonas homogéneas de ladera, definidas como la combinación del mapa de aspecto y pendiente.

El factor condicionante de Geología en términos de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) es la principal variable para los análisis de amenaza por movimientos en masa, pues describe el comportamiento mecánico de los materiales de las laderas. La construcción de mapa de UGS es el proceso de mayor inversión en los trabajos de zonificación de amenaza.

Aunque para el análisis de cambio en la cobertura del terreno la guía del Servicio Geológico Colombiano recomienda utilizar mapas de cobertura de información antecedente, para este trabajo se concluye que es recomendable utilizar mapas de cobertura antecedentes, porque al operar los mapas, se generan importantes distorsiones en el resultado final, producto de la diferencia en la interpretación y escala de análisis de año a año.

La calidad de los resultados mediante el método de Pesos de Evidencia (WofE) está determinada por la escala de levantamiento de cada uno de los factores condicionantes y detonantes. El levantamiento en diferentes escalas distorsiona los resultados y no permite un ajuste adecuado de los Índices de Susceptibilidad y Amenaza, con los que se construye el mapa de amenaza final.

La construcción de curvas de éxito es un método adecuado para la medición de la bondad de representación de las zonas inestables y para la clasificación en categorías pues brinda un criterio estadísticamente basado para la selección de los factores adecuados.

El mapa de densidad de deslizamientos permite comparar los índices de susceptibilidad (LSI) con una variable continua en el espacio, dando una idea general del comportamiento de los materiales en la zona y permitiendo una selección adecuada del índice de susceptibilidad a deslizamientos.

El Déficit de Humedad del Suelo (SMD) permite asociar espacialmente el nivel freático a lo largo de las laderas, teniendo en cuenta las áreas de aporte de flujo aguas arriba a partir del Índice Topográfico de Humedad (TWI). La variación del Déficit de Humedad del Suelo (SMD) con diferentes valores de precipitación efectiva, es consecuente con lo que se pretende representar como efecto de la precipitación. El modelo describe que a mayor precipitación el valor del SMD disminuye, correspondiendo a un aumento en el nivel freático, incluso llegando a valores negativos que representan flujo superficial en la ladera.

Para los análisis de amenaza se pueden utilizar los factores que sean necesarios, pues los métodos propuestos permiten estimar la influencia de todas las variables y sus posibles combinaciones, pudiendo seleccionar la combinación que más represente la condición de inestabilidad para cada sitio de estudio.

El tamaño de la unidad de análisis definida como el pixel, requiere de la resolución suficiente para la representación de la información de acuerdo a la escala y deberá ser basado en la resolución del modelo de elevación digital (DEM) para la zona de estudio. Se considera adecuado el uso del DEM disponible del proyecto satelital ALOS PALSAR de 12.5 x 12.5 m para escala 1:25.000.

6.1.2 Conclusiones de la aplicación de la metodología en la cuenca de la quebrada El Rosario

Para la cuenca de la quebrada El Rosario, se encuentra que los materiales presentes son en su mayoría de origen sedimentario a partir de depositaciones del complejo volcánico Ruiz-Tolima. Son materiales con un alto grado de meteorización en los que predominan limos arenosos de media a alta plasticidad y permeabilidad con espesores variables.

Los movimientos en masa predominantes corresponden a deslizamientos traslacionales, procesos erosivos y en menor proporción deslizamientos rotacionales, debidos principalmente a desconfinamientos de las partes bajas de las laderas por efectos antrópicos y socavación de las corrientes de agua. El inventario de deslizamientos definido a partir de la metodología propuesta para la cuenca de estudio cuenta con 142 registros.

De acuerdo a los análisis de susceptibilidad realizados, se puede identificar que los factores de uso de suelo, pendiente, clasificación agrológica de suelos, aspecto y geología definen en gran medida la susceptibilidad del terreno para la cuenca, pues corresponden a las variables de mayor peso en los análisis de pesos de evidencia.

Del mapa final de amenaza, se puede observar que la parte alta de la cuenca tiene una amenaza media y alta mientras que en la parte baja predomina la amenaza baja, siendo un mapa consecuente con el inventario de procesos obtenido y el conocimiento de la cuenca.

6.2 Recomendaciones

A partir del mapa de aspecto que define laderas individuales es posible plantear análisis determinísticos de estabilidad para dichas laderas en sistemas de información geográfica en posibles investigaciones posteriores. El factor aspecto también es posible evaluar otros factores que podrían influir en la inestabilidad de laderas como la dirección preferente del viento y el tiempo de exposición solar, que afectarían el contenido de agua de los materiales.

Es recomendado plantear un estudio particular para el sistema de clasificación de rangos de pendiente adecuada de acuerdo a la morfometría de la cuenca y al mismo inventario de deslizamientos, pues cada cuenca particular puede presentar rangos de pendientes propios, que describan el comportamiento de los materiales.

Para la curvatura en planta es posible adelantar un amplio trabajo en la clasificación de rangos de la curvatura con validaciones y mediciones precisas en campo, que permitan asociar los resultados a la ocurrencia de movimientos en masa.

Aunque en el presente trabajo se realizó el análisis con una lluvia uniforme en toda la cuenca es importante analizar la variación espacial de la precipitación de acuerdo al área de estudio. Con el modelo para la estimación de la respuesta hidrológica sería posible hacer análisis de lluvia antecedente, teniendo en cuenta la validación y calibración del modelo. Requiriendo para ello suficientes datos de caudales para la cuenca y de la permeabilidad de los materiales

Para la realización de los trabajos se recomienda del uso de sistemas de información geográfica, los cuales permiten procesar, analizar y almacenar información georreferenciada, optimizando el trabajo y los resultados finales. Se recomienda el uso de software de SIG libre como QGIS, SAGA y GRASS, los cuales fueron descritos en el trabajo.

Para la selección de las variables de entrada al modelo de susceptibilidad se recomienda comparar los pesos de evidencia finales individuales de mayor significancia de todas las variables analizadas, con el fin de encontrar los factores que mejor representen la inestabilidad de la zona.

Se recomienda la verificación en campo del inventario levantado mediante la metodología propuesta en oficina. Se recomienda el uso de la aplicación móvil LandSlide Collector v0.0, desarrollada en el presente trabajo de tesis. La versión utilizada se encuentra disponible en el siguiente link: <https://drive.google.com/file/d/1yR6SvjV8p-B9gSF7lnZ6bPHoFPDxyUXN/view?usp=sharing>

Para definir con alguna certeza el valor de SMD, se requiere de la calibración y validación del modelo hidrológico completo. Se recomienda la calibración del modelo de acuerdo a algún método de calibración como: NSE, GLUE, PEST o Monte Carlo.

Aunque para el presente trabajo se utilizaron valores de precipitación efectiva constantes, se recomienda la espacialización de las variables hidroclimatológicas de acuerdo a la distribución de las estaciones cercanas y mediante los métodos como polígonos de Thiessen, inverso de la distancia ponderada (IDW) o Kriging, ampliamente utilizados en la modelación del ciclo hidrológico.

Aunque no corresponde a la finalidad del documento de tesis, se recomienda la presentación de los mapas finales de amenaza de acuerdo a las representaciones cartográficas y de rotulado propuestas por el Servicio Geológico Colombiano (2017), con el fin de homogenizar la presentación y las convenciones utilizadas en el tema de amenaza por procesos naturales.

A. Anexo: Inventario de deslizamientos levantado con la metodología propuesta para la cuenca de la quebrada El Rosario

TABLA ANEXA 01 – NOMENCLATURA PARA LA INTERPRETACIÓN DE LA TABLA DEL INVENTARIO DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA A PARTIR DE ANÁLISIS DE IMÁGENES CON GOOGLE EARTH PRO.

ID	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
ID_TD1	IDENTIFICADOR FINAL PERSONAL	1
1	CALIDAD DE IMAGEN Y VISIBILIDAD	HR
2	FORMAS CARACTERÍSTICAS DE INESTABILIDAD	MA
3	TEXTURA	TR
4	POSIBLES DETONANTES FÍSICOS	CU
5	EVALUACIÓN HISTORICA	TN
6	CLASIFICACIÓN DE PROCESOS (CRUDEN & VARNES 1998)	DEFGP
7	FECHA DE LA IMAGEN SOBRE LA QUE SE DIGITALIZÓ	07/03/2015
8	IDENTIFICADOR DEL POLÍGONO TRAZADO	PG001
9	ÁREA EN METROS CUADRADOS	5881.72
10	LATITUD EN GRADOS DECIMALES	5.0622
11	LONGITUD EN GRADOS DECIMALES	-75.5270

TABLA ANEXA 02 – INVENTARIO DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA EL ROSARIO.

ID	1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11
1	HR	MA	TR	CU	IC	ED	TN	DEFGP	07/03/2015	PG001	5881.72	5.0622	-75.5270
2	HR	PE	TL	CU	IC		TN	ROTAC	07/03/2015	PG003	8556.10	5.0573	-75.5284
3	HR	MA	TR	CU	IC		TN	DEFGP	07/03/2015	PG004	9660.99	5.0508	-75.5305

ID	1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11
4	HR	PR	TL	IC	CC		TI	TRANS	07/03/2015	PG005	1182.03	5.0599	-75.5317
5	HR	MA	TR	CU	IC		TN	DEFGP	07/02/2015	PG006	5461.44	5.0529	-75.5320
6	HR	MA	TL	CU	IC		TI	DEFGP	07/03/2015	PG007	8609.91	5.0583	-75.5323
7	HR	MA	TL	CU			TI	DEFGP	07/03/2015	PG008	496.43	5.0594	-75.5323
8	HR	PE	TL	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG010	345.54	5.0591	-75.5341
9	HR	MA	TL	CU	IC		TI	DEFGP	07/03/2015	PG012	45960.60	5.0698	-75.5358
10	HR	MA	TL	IC			TI	DEFGP	07/03/2015	PG013	16383.40	5.0532	-75.5356
11	HR	PR	TL	CU			TI	ROTAC	07/03/2015	PG014	317.13	5.0631	-75.5362
12	HR	PR	TL	IC			TI	TRANS	07/03/2015	PG015	1058.87	5.0507	-75.5363
13	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG016	846.62	5.0568	-75.5363
14	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG017	361.31	5.0572	-75.5364
15	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG018	719.42	5.0574	-75.5365
16	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG019	338.42	5.0569	-75.5367
17	HR	PR	TR	CU	ED	IC	TI	EROHC	07/03/2015	PG020	114383.00	5.0409	-75.5370
18	HR	MA	TL	CU	ED		TI	FLUJO	07/03/2015	PG023	1851.90	5.0454	-75.5386
19	HR	PR	TL	CU	IC		TN	TRANS	07/02/2015	PG025	2931.20	5.0588	-75.5386
20	HR	PE	TL	IC			TI	ROTAC	07/03/2015	PG027	9694.37	5.0527	-75.5391
21	HR	PE	TL	CU	IC		TI	ROTAC	07/03/2015	PG029	5076.81	5.0268	-75.5396
22	HR	PR	TL	CU	ED	IC	TI	TRANS	07/03/2015	PG031	1094.27	5.0298	-75.5397
23	HR	PR	TL	CU	CC		TI	TRANS	07/03/2015	PG032	508.92	5.0456	-75.5399
24	HR	MA	TL	CC	CU		TI	TRANS	07/03/2015	PG033	931.31	5.0379	-75.5401
25	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG036	126.35	5.0532	-75.5407
26	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG037	567.53	5.0534	-75.5406
27	HR	PE	TL	CU	IC		TI	ROTAC	07/03/2015	PG038	2370.96	5.0530	-75.5410
28	HR	PR	TL	CU	IC		TN	ROTAC	07/02/2015	PG040	684.30	5.0528	-75.5414
29	HR	PR	TL	CU	IC	ED	TI	COMPL	07/03/2015	PG042	1184.37	5.0465	-75.5415
30	HR	OV	TL	CU			TI	ROTAC	07/03/2015	PG044	4351.58	5.0205	-75.5421
31	HR	PR	TL	CC			TI	ROTAC	07/03/2015	PG045	991.81	5.0483	-75.5420
32	HR	PR	TL	CU	CC		TI	TRANS	07/03/2015	PG046	2181.81	5.0370	-75.5419
33	HR	PR	TL	IC	ED		TI	EROHC	07/03/2015	PG047	1102.36	5.0709	-75.5421
34	HR	PR	TL	CU	ED		TI	ROTAC	07/03/2015	PG048	1367.25	5.0652	-75.5422
35	HR	MA	TR	CU	IC		TN	DEFGP	07/02/2015	PG049	7371.21	5.0592	-75.5421
36	HR	PR	TL	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG050	219.14	5.0647	-75.5422
37	HR	MA	TL	CU	IC		TN	ROTAC	07/02/2015	PG052	497.92	5.0529	-75.5423
38	HR	MA	TR	CU	IC		TN	DEFGP	07/03/2015	PG053	6675.38	5.0541	-75.5427
39	HR	PR	TL	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG054	524.41	5.0644	-75.5425


ID	1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11
40	HR	PR	TL	ED	IC		TN	TRANS	07/03/2015	PG055	566.84	5.0528	-75.5425
41	HR	PR	TL	CU	ED		TI	TRANS	07/03/2015	PG056	297.97	5.0471	-75.5426
42	HR	MA		TL	CU		TN	TRANS	07/03/2015	PG057	487.00	5.0272	-75.5427
43	HR	OV	TL	CC	CU		TN	TRANS	07/03/2015	PG058	782.83	5.0365	-75.5429
44	HR	PR	TL	CU	IC		TI	COMPL	07/03/2015	PG059	1393.50	5.0545	-75.5434
45	HR	MA	TL	CC			TN	TRANS	07/03/2015	PG060	1320.83	5.0376	-75.5433
46	HR	MA	TL	IC	CU		TI	TRANS	07/03/2015	PG062	512.35	5.0701	-75.5437
47	HR	MA	TL	CU			TN	TRANS	07/02/2015	PG063	1220.51	5.0393	-75.5441
48	HR	MA	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG064	520.83	5.0597	-75.5446
49	HR	PR	TL	CU	IC	ED	TI	TRANS	07/03/2015	PG065	283.65	5.0516	-75.5446
50	HR	MA	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG067	328.42	5.0222	-75.5451
51	HR	PR	TL	CU	IC	ED	TI	TRANS	03/02/2015	PG068	2908.01	5.0598	-75.5452
52	HR	MA	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG069	347.23	5.0665	-75.5452
53	HR	MA	TL	CC			TI	ROTAC	07/03/2015	PG070	1637.00	5.0370	-75.5461
54	HR	PR	TR	CU		IC	TI	TRANS	07/03/2015	PG071	265.53	5.0239	-75.5464
55	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG075	278.59	5.0525	-75.5475
56	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG076	504.02	5.0521	-75.5475
57	HR	PR	TL	CU	ED	IC	TI	TRANS	07/03/2015	PG077	133.14	5.0238	-75.5477
58	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG078	435.04	5.0521	-75.5477
59	HR	PR	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG080	390.62	5.0565	-75.5484
60	HR	MA	TR	CU		IC	TN	TRANS	07/03/2015	PG083	834.15	5.0434	-75.5488
61	HR	MA	TR	IC	CU		TN	EROHC	07/03/2015	PG084	26689.40	5.0162	-75.5492
62	HR	PR	TL	CU	ED		TI	ROTAC	07/03/2015	PG085	1191.54	5.0453	-75.5493
63	HR	PR	TL	CU	ED	CC	TI	ROTAC	07/03/2015	PG086	165.07	5.0434	-75.5499
64	HR	PR	TL	CU	IC	CC	TI	TRANS	07/03/2015	PG087	363.48	5.0258	-75.5499
65	HR	MA	TL	CU	IC	ED	TI	TRANS	07/03/2015	PG089	214.70	5.0544	-75.5508
66	HR	PR	TR	VC			TN	FLUJO	07/03/2015	PG090	2044.94	5.0525	-75.5511
67	HR	PR	TL	CU	CC		TI	ROTAC	07/03/2015	PG091	1421.68	5.0600	-75.5519
68	HR	MA	TL	CU	IC		TN	COMPL	07/03/2015	PG092	10107.60	5.0179	-75.5537
69	HR	MA	TL	CC			TI	TRANS	07/03/2015	PG093	2814.23	5.0347	-75.5540
70	HR	MA	TL	CU	IC	CC	TN	COMPL	07/03/2015	PG095	6224.11	5.0177	-75.5549
71	HR	PR	TL	IC	CC	ED	TN	ROTAC	07/03/2015	PG096	1861.72	5.0580	-75.5554
72	HR	PR	TL	IC	CC		TN	ROTAC	07/03/2015	PG097	1975.72	5.0590	-75.5560
73	HR	PR	TL	CU	ED	IC	TI	FLUJO	07/03/2015	PG098	550.64	5.0460	-75.5571
74	HR	MA	TR	CU	CC		TN	TRANS	07/03/2015	PG101	291.00	5.0166	-75.5577
75	HR	PR	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG102	467.78	5.0514	-75.5579


ID	1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11
76	HR	PR	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG103	283.76	5.0511	-75.5581
77	HR	MA	TL	CC	IC	ED	TI	TRANS	07/03/2015	PG104	397.90	5.0583	-75.5582
78	HR	MA	TR	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG106	211.10	5.0529	-75.5584
79	HR	MA	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG107	112.08	5.0531	-75.5583
80	HR	MA	TL	CU	CC		TI	TRANS	07/03/2015	PG108	412.09	5.0391	-75.5586
81	HR	MA	TL	CU	IC		TI	ROTAC	07/03/2015	PG109	871.13	5.0532	-75.5586
82	HR	PR	TL		ED		TI	FLUJO	07/03/2015	PG110	639.29	5.0143	-75.5588
83	HR	PR	TL	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG111	228.00	5.0519	-75.5590
84	HR	PR	TR	CU	ED	IC	TI	TRANS	07/03/2015	PG113	536.94	5.0431	-75.5592
85	HR	MA	OV	TL	CU		TI	FLUJO	07/03/2015	PG115	378.86	5.0228	-75.5601
86	HR	PR	PE	TR	IC	CC	TI	FLUJO	07/03/2015	PG118	695.14	5.0405	-75.5609
87	HR	MA	TR	CU	IC	ED	TN	EROHC	07/03/2015	PG119	2278.04	5.0494	-75.5609
88	HR	MA	TR	IC	CU	CC	TI	ROTAC	07/03/2015	PG120	368.13	5.0380	-75.5614
89	HR	MA		TL	IC	CU	TI	COMPL	07/03/2015	PG121	8885.60	5.0402	-75.5617
90	HR	MA	OV	TL	CU	IC	TI	TRANS	07/03/2015	PG122	1815.77	5.0291	-75.5637
91	HR	MA	TL	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG124	167.91	5.0284	-75.5664
92	HR	PR	TR	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG125	1328.00	5.0099	-75.5673
93	HR	MA	PE	TL	IC		TI	ROTAC	07/03/2015	PG126	24064.60	5.0526	-75.5670
94	HR	MA	TR	CU			TN	DEFGP	07/03/2015	PG128	23597.20	5.0178	-75.5679
95	HR	MA	TR	CU			TN	DEFGP	07/03/2015	PG129	3200.82	5.0117	-75.5682
96	HR	PR	TL	CU	ED	IC	TI	TRANS	07/03/2015	PG130	335.98	5.0457	-75.5685
97	HR	MA	TL	CU	ED		TI	FLUJO	07/03/2015	PG132	609.73	5.0464	-75.5698
98	HR	PE	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG133	306.82	5.0172	-75.5703
99	HR	PR	TL	CU	ED		TI	TRANS	07/03/2015	PG134	1035.34	5.0468	-75.5708
100	HR	PR	TL	CU	IC	ED	TI	TRANS	07/03/2015	PG135	570.98	5.0487	-75.5709
101	HR	MA	TL	CU	ED		TI	TRANS	07/03/2015	PG136	273.94	5.0466	-75.5715
102	HR	MA	TL	CU	IC		TI	FLUJO	07/03/2015	PG138	1495.06	5.0445	-75.5731
103	HR	MA	TR	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG141	588.94	5.0399	-75.5746
104	HR	PR	TL	CU			TI	TRANS	07/03/2015	PG144	308.27	5.0398	-75.5756
105	HR	MA	TR	CU			TN	EROHC	07/03/2015	PG145	680.17	5.0027	-75.5763
106	HR	MA	TR	CU	IC		TN	EROHC	07/03/2015	PG146	3642.33	5.0041	-75.5765
107	HR	MA	TL	CU	IC		TN	TRANS	07/03/2015	PG147	770.41	5.0082	-75.5768
108	HR	PR	TL	CU	ED	IC	TI	FLUJO	07/03/2015	PG149	749.25	5.0133	-75.5791
109	HR	MA	TL	CU			TI	FLUJO	06/11/2014	PG154	395.90	4.9973	-75.5815
110	HR	PR	TL	CU	ED	CC	TI	TRANS	07/03/2015	PG158	129.58	4.9970	-75.5856
111	HR	PE	TL	CU	ED	CC	TI	TRANS	07/03/2015	PG159	536.39	4.9968	-75.5857

ID	1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11
112	HR	MA	TO	CU			TN	DEFGP	07/03/2015	PG162	15655.50	5.0246	-75.5879
113	HR	MA	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG165	966.01	4.9965	-75.5879
114	HR	MA	TL	CU	CC		TI	ROTAC	07/03/2015	PG166	632.91	5.0255	-75.5882
115	HR	MA	TL	CU	ED		TI	TRANS	07/03/2015	PG167	397.83	5.0126	-75.5888
116	HR	MA	TL	ED	CU		TI	FLUJO	07/03/2015	PG168	290.99	5.0363	-75.5891
117	HR	MA	TL	CU			TN	TRANS	07/03/2015	PG169	327.28	5.0372	-75.5892
118	HR	MA	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG170	404.52	5.0200	-75.5924
119	HR	MA	TL	CU	IC		TI	COMPL	07/03/2015	PG171	6765.33	5.0453	-75.5948
120	HR	MA	TR	IC	PP		TN	ROTAC	07/03/2015	PG901	1098.08	5.0433	-75.5372
121	HR	PE	TR	IC	PP		TN	ROTAC	07/03/2015	PG902	2347.58	5.0430	-75.5375
122	HR	MA	TR	CU	PP		TN	COMPL	07/03/2015	PG903	5598.70	5.0405	-75.5390
123	HR	MA	TR	CU	PP		TN	TRANS	07/03/2015	PG904	1351.60	5.0389	-75.5397
124	HR	PR	TR	CU	ED	IC	TI	EROHC	07/03/2015	PG905	84617.10	5.0373	-75.5382
125	HR	PR	TR	CU	PP	IC	TI	TRANS	07/03/2015	PG906	1504.57	5.0355	-75.5371
126	HR	MA	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG907	244.09	5.0233	-75.5402
127	HR	MA	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG908	383.49	5.0344	-75.5407
128	HR	PR	TL	CU	IC		TI	TRANS	02/03/2015	PG909	281.91	5.0462	-75.5413
129	HR	MA	TR	ED			TI	FLUJO	07/03/2015	PG991	646.04	5.0638	-75.5347
130	HR	PR	TR	CC			TI	ROTAC	22/05/2006	PG992	1184.00	5.0575	-75.5583
131	HR	PR	TR	CC			TI	TRANS	22/05/2006	PG993	3762.71	5.0564	-75.5589
132	HR	MA	TL	IC			TI	TRANS	06/11/2014	PG994	964.04	5.0514	-75.5463
133	HR	MA	TL	IC			TI	TRANS	07/03/2015	PG995	343.71	5.0527	-75.5412
134	HR	MA	TL	IC			TI	TRANS	02/03/2015	PG996	120.47	5.0535	-75.5405
135	HR	PR	TL	PP	IC		TN	TRANS	07/03/2015	PG998	242.29	5.0428	-75.5371
136	HR	MA	TL	PP	IC		TN	ROTAC	07/03/2015	PG999	2347.86	5.0428	-75.5379
137	HR	MA	TR	CU			TI	FLUJO	07/03/2015	PG500	377.21	5.0223	-75.5470
138	HR	MA	TR	CC	IC		TI	ROTAC	22/05/2006	PG501	1053.27	5.0552	-75.5589
139	HR	MA	TR	CU			TI	TRANS	22/05/2006	PG502	626.01	5.0266	-75.5668
140	HR	MA	TR	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG503	642.62	5.0071	-75.5769
141	HR	PR	TR	ED			TI	TRANS	07/03/2015	PG504	643.65	4.9989	-75.5879
142	HR	MA	TL	CU	IC		TI	TRANS	07/03/2015	PG505	1049.50	5.0289	-75.5635

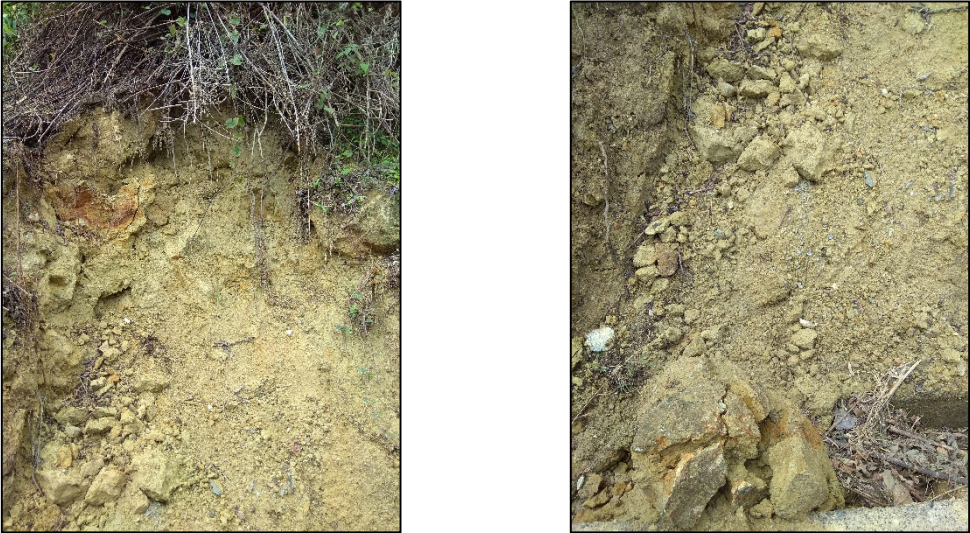
B. Anexo: Visita de reconocimiento de campo

VALIDACIÓN DE PROCESOS INESTABLES, DESCRIPCIÓN DE SUELOS, OBRAS Y ANÁLISIS DE MORFOMETRIA (ASPECTO, PENDIENTE Y CURVATURA) PARA LA CUENCA DE QUEBRADA EL ROSARIO




Descripción: ESTB 1	Fecha: jueves 29/03/18	Lat:5°4'6.69"N Long:75°31'27.43"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA		
		
REGISTO FOTOGRÁFICO FJST HORA 8:01 AM		
NOTAS: Punto estabilizado con obras de drenaje, presencia de canal de disipación y zanjas de coronación. Modificación del talud mediante terraceo y protección con revegetalización. En la parte baja la vía está cerrada.		

DESCRIPCIÓN:	DSL 1	Fecha: jueves 29/03/18	Lat: 5° 4'11.43"N Long: 75°31'33.11"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 8:05 – 8:07 AM			
NOTAS: Material de tipo Coluvión de grandes tamaños, presencia de agua y alta humedad en la zona. Presencia de obra de encole.			

DESCRIPCIÓN:	DSL 2	Fecha: jueves 29/03/18	Lat:5°4'7.06"N Long: 75°32'1.58"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 9:53 – 9:54 AM			
NOTAS: Material de tipo coluvión embebido en matriz limo arenosa			



DESCRIPCIÓN:	DSL 3	Fecha: sábado 31/03/18	Lat:5°3'9.43"N Long:75°32'35.65"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO FJST HORA 1:25 PM			
NOTAS: Evidencia de saprolito altamente meteorizado con contenido arenoso			


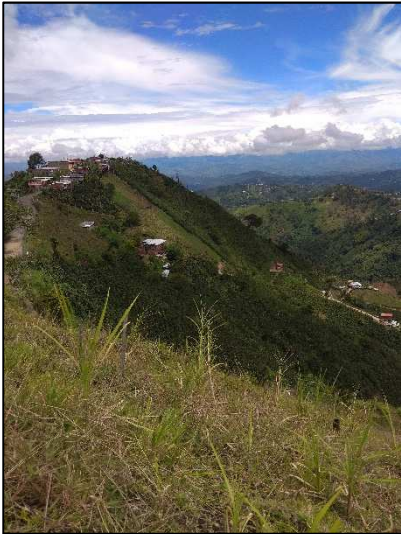
DESCRIPCIÓN:	DSL 4	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 1'10.17"N Long: 75°32'26.60"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO FJST HORA 2:31 PM			
NOTAS: Descripción del suelo como limo volcánico arenoso de color café claro con presencia de lapilli, espesor mayor a 3,0m (visible).			


DESCRIPCIÓN:	VAP 1	Fecha: jueves 29/03/18	Lat:5°4'30.09"N Long: 75°32'12.05"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 8:22 – 8:36 AM			
NOTAS: Visualización y validación de aspecto comprobado, ladera 2 de tipo convexo.			
DESCRIPCIÓN:	VAP 2	Fecha: jueves 29/03/18	Lat:5°4'16.20"N Long: 75°32'25.05"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 8:49 – 8:56 AM			
NOTAS: Visualización y validación de aspecto comprobado.			

DESCRIPCIÓN:	VAP 3	Fecha: jueves 29/03/18	Lat: 5°4'4.72"N Long: 75°32'4.23"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 9:41 – 9:46 AM			
NOTAS: Visualización y validación de aspecto comprobado, presencia de proceso PG12.			





DESCRIPCIÓN:	VAP 4	Fecha: jueves 29/03/18	Lat: 5°3'13.93"N Long: 75°32'19.42"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:16 – 10:21 AM			
NOTAS: Validación de aspecto y visualización deslizamiento La Estampilla			

DESCRIPCIÓN:	VAP 5	Fecha: sábado 31/03/18	Lat:5°3'23.38"N Long: 75°32'37.47"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 11:47 AM			
NOTAS: Se valida el aspecto y se corrobora con el identificador de ladera ID 248 dirección oeste.			
DESCRIPCIÓN:	VAP 6	Fecha: sábado 31/03/18	Lat:5°3'23.38"N Long: 75°32'37.47"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 11:57 AM			
NOTAS: Se valida el aspecto y se corrobora que se mantiene con el identificador de ladera ID 248 dirección oeste.			

DESCRIPCIÓN:	VAP 7	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 2'37.87"N Long: 75°32'9.23"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:00 – 10:04 AM			
NOTAS: Verificación y validación de aspecto ladera ID: 549, ladera con presencia de reptación en parte alta con sobrecarga de viviendas.			
DESCRIPCIÓN:	VAP 8	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 2'33.63"N Long: 75°32'16.37"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 11:03 – 11:07 AM			
NOTAS: Verificación y validación de aspecto ladera ID: 496 sentido PR15 y ID: 602 sentido cárcava.			


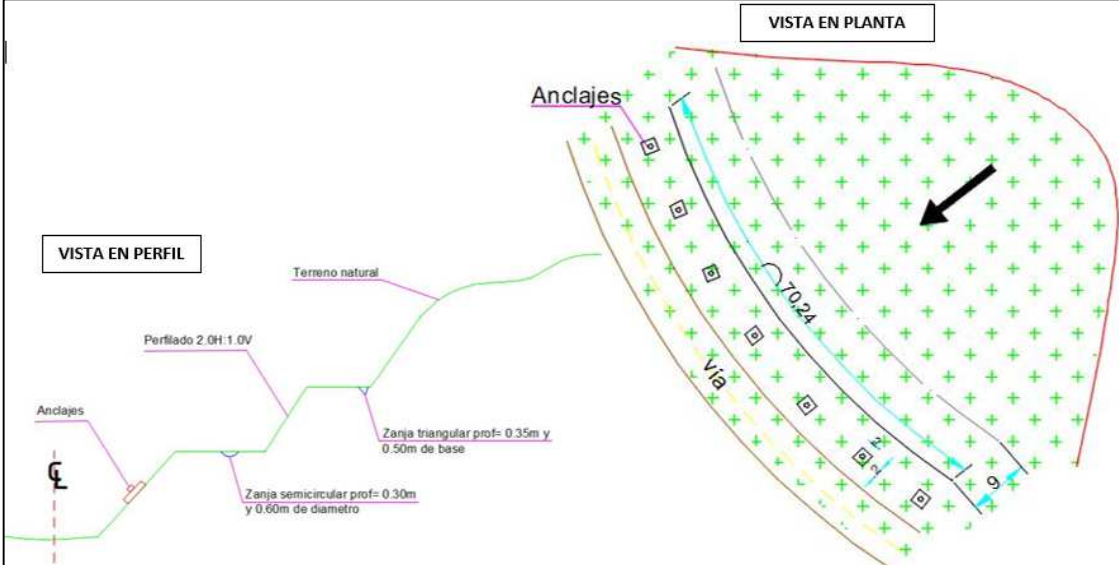
DESCRIPCIÓN:	VAP 9	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 1'20.80"N Long: 75°32'24.71"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 2:24 – 2:28 PM			
NOTAS: Verificación y validación de aspecto ladera ID: 1265. Nuevo proceso cárcava.			

DESCRIPCIÓN:	OD 1	Fecha: jueves 29/03/18	Lat:5°3'47.98"N Long: 75°31'36.10"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:03 – 10:04 AM			
NOTAS: Presencia de obras de drenaje.			

DESCRIPCIÓN:	VCC 1	Fecha: sábado 31/03/18	Lat:5°3'29.06"N Long: 75°32'15.83"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 11:13 – 11:14 AM			
NOTAS: Vista de cauce con lecho en roca presencia de box culvert y caída de agua			
DESCRIPCIÓN:	CA 1	Fecha: sábado 31/03/18	Lat: 5° 1'47.25"N Long: 75°34'47.74"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 4:04 – 4:14 PM			
NOTAS: CUERPO DE AGUA QUEBRADA EL ROSARIO			



DESCRIPCIÓN:	PR 1	Fecha: jueves 29/03/18	Lat: 5°4'14.01"N Long: 75°31'35.64"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTRO FOTOGRÁFICO FJST HORA 8:01 AM			
NOTAS: Proceso estabilizado con obras de terraceo y drenaje. Zona urbana.			



DESCRIPCIÓN:	PR 2	Fecha: jueves 29/03/18	Lat:5°3'9.93"N Long: 75°32'27.86"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:28 – 11:04 AM			
NOTAS: Proceso validado PG038, estabilizado con anclajes (9 por fila con 6 torones c/u) y concreto lanzado en taludes perfilados y terraceados. En la parte alta del talud se evidencia la presencia de una pantalla de concreto. Las obras de drenaje comprenden zanjás de coronación, drenes horizontales (5 niveles) y canales perimetrales. Se demarca la presencia de gaviones revestidos de concreto de 4 a 2 cajas (en sección transversal) de acuerdo con la diferencia de nivel de la vía.			

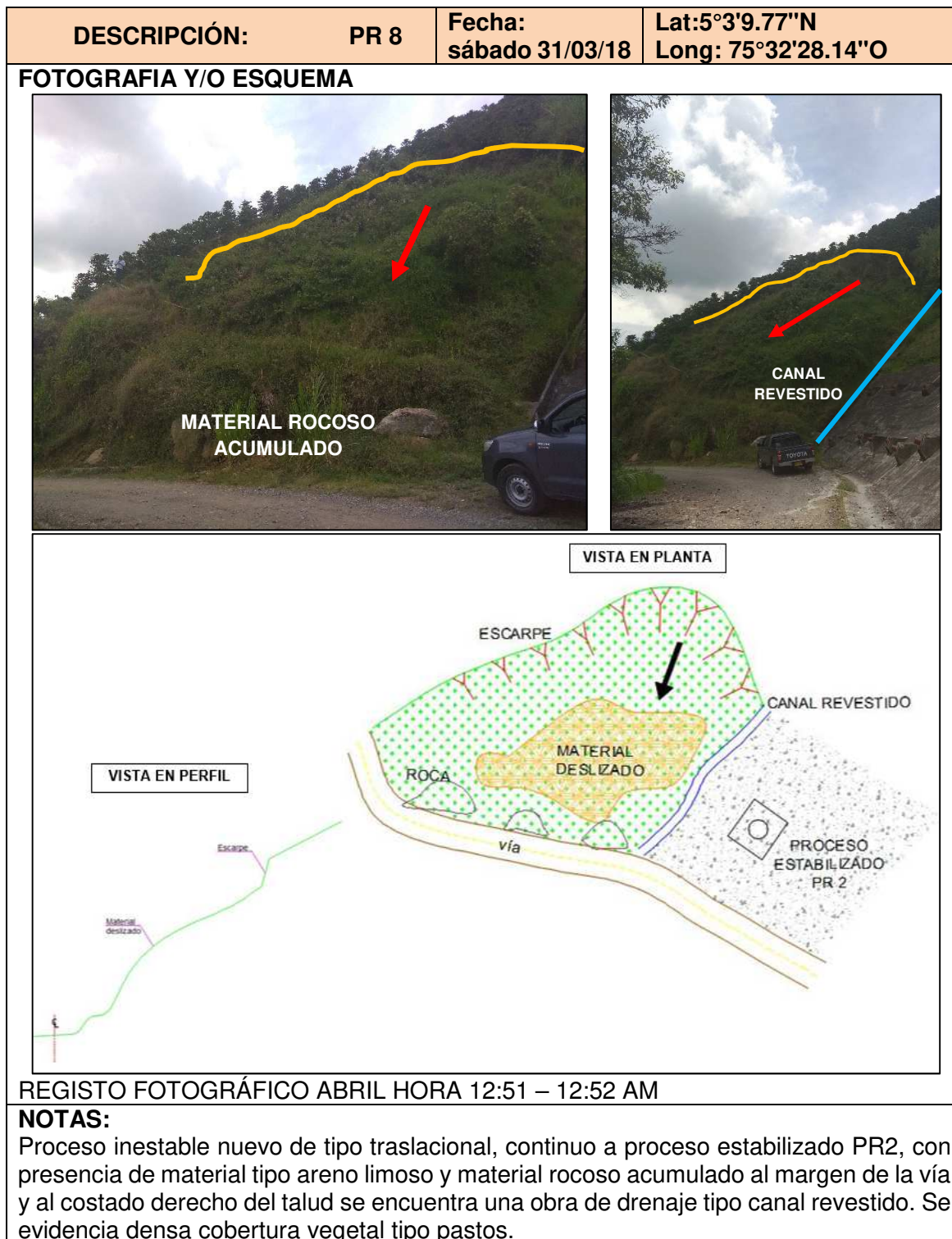
DESCRIPCIÓN:	PR 3	Fecha: sábado 31/03/18	Lat:5°3'16.07"N Long: 75°32'6.41"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:45 – 10:51 AM			
NOTAS: Proceso nuevo sobre la vía El Arenillo, posible PG027 estabilizado con obras con fila de 8 muertos de anclaje (4 torones c/u), como obras de drenaje presenta 2 canales de coronación con anchos variables entre 50 (sección triangular) y 60cm (sección semicircular) a 35cm de profundidad en promedio. Los taludes presentan densa cobertura vegetal de tipo pasto. En la vía hay presencia de una pequeña obstrucción en cuneta debido a desprendimiento de material en el costado inferior del proceso			

DESCRIPCIÓN:	PR 4	Fecha: sábado 31/03/18	Lat: 5°3'30.14"N Long: 75°32'17.22"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 11:04 – 11:11 AM			
NOTAS: Proceso estabilizado con niveles de gaviones revestidos de concreto, cajas de 1,0x1,0m, 2 niveles a la vista desde el nivel de la vía, en aproximadamente 16,0m de longitud. La altura del talud es de 6,0m, se encuentra con presencia de densa vegetación y no tiene obras de drenaje.			

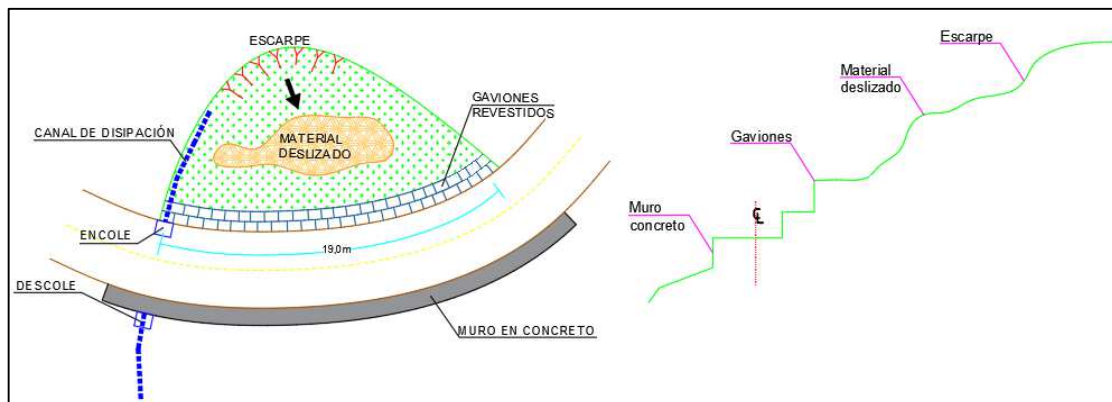
DESCRIPCIÓN:	PR 5	Fecha: sábado 31/03/18	Lat: 5°3'29.46"N Long: 75°32'14.61"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 11:17 – 11:18 AM			
NOTAS: Proceso estabilizado con pantalla de concreto, longitud de contención del orden de 18,0m y altura superior a 7,0m. En la zona se encuentra densa vegetación y sensación húmeda. Se valida el aspecto y se corrobora con el identificador de ladera ID 197.			

DESCRIPCIÓN:	PR 6	Fecha: sábado 31/03/18	Lat: 5°3'11.69"N Long: 75°32'25.18"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>VISTA EN PLANTA</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>VISTA EN PERFIL</p>  </div> </div>			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 12:08 – 12:10 AM			
<p>NOTAS:</p> <p>Proceso inestable posiblemente rotacional (PG096) con densa vegetación y circulación de agua a lo largo del talud que presume una condición de saturación y alta sensación de humedad, en la parte alta se evidencia sobrecarga debido a la presencia de viviendas, las cuales pueden estar desechando aguas servidas y generando descarga sobre el talud.</p> <p>Al revisar el aspecto de esta ladera coincide con el indicado ID 331 azimuth 230° y dirección sur este.</p>			

DESCRIPCIÓN:	PR 7	Fecha: sábado 31/03/18	Lat:5°3'10.86"N Long: 75°32'25.76"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 12:35 AM			
NOTAS: Proceso inestable pequeño dentro de propiedad privada.			



DESCRIPCIÓN:	PR 9	Fecha: sábado 31/03/18	Lat:5°3'9.95"N Long: 75°32'29.61"O
---------------------	-------------	---	---

FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA

REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 12:08 – 12:10 AM

NOTAS:

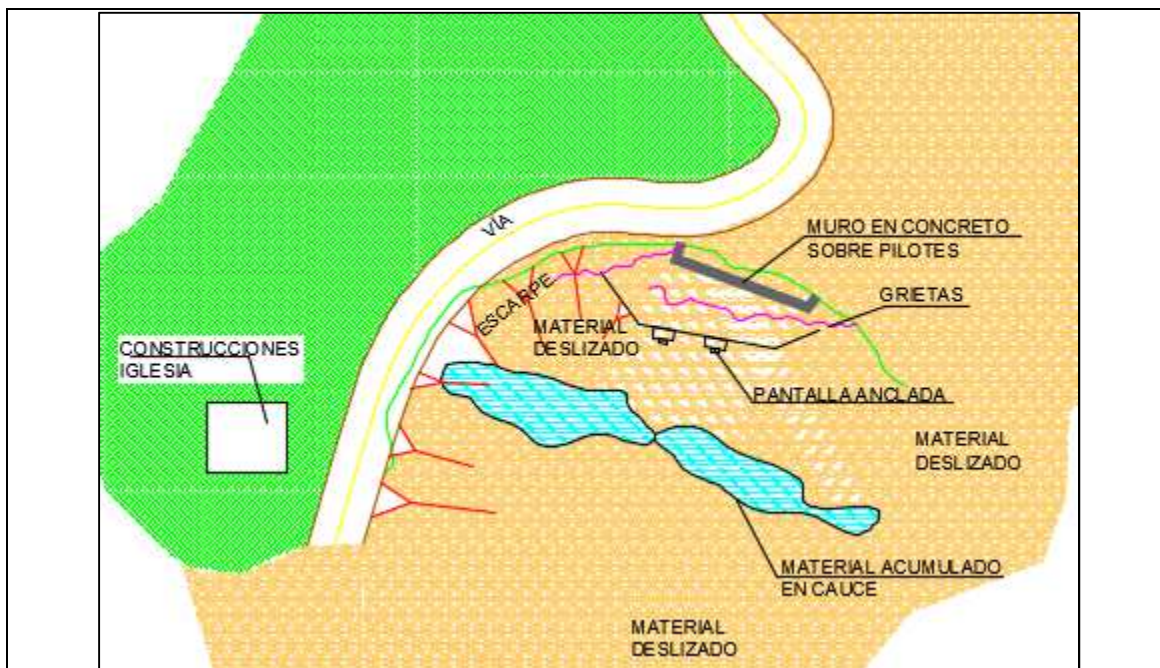
Proceso estabilizado con obras (posible PG040), presenta densa cobertura vegetal en el talud superior de la vía, estabilizado mediante muro en gaviones de 19,0m de longitud y 2,0m de altura revestidos y obras de drenaje perimetral, canal disipador de energía, zanjas de coronación y cunetas. Al costado inferior de la vía se evidencia la presencia de muro de contención en concreto.

Al revisar el aspecto de esta ladera coincide con el indicado ID 231.

DESCRIPCIÓN:	PR 10	Fecha: sábado 31/03/18	Lat: 5° 3'9.81"N Long: 75°32'32.87"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 1:27 – 1:33 PM			
<p>NOTAS:</p> <p>Proceso inestable grande posiblemente la unión del PG052 y el PG055, actualmente se evidencia densa presencia de cobertura vegetal, acumulación del material deslizado en el talud superior de la vía con alto contenido de humedad, la reptación es particularmente visible en todo el talud.</p> <p>El detonante de este proceso es la lluvia, el desprendimiento de material es reincidente desde hace 4 años, ocasionando taponamiento de la vía y peligro para los usuarios.</p> <p>En algunas partes cercanas a la vía se logra identificar presencia de roca. Posible coluvión en matriz limo arenosa.</p> <p>En el talud inferior de la vía se puede observar un muro de concreto cabeceado.</p> <p>Presencia de viviendas expuestas a posible caída de material.</p>			

DESCRIPCIÓN:	PR 11	Fecha: sábado 31/03/18	Lat: 5° 1'56.09"N Long: 75°34'42.52"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
REGISTO FOTOGRÁFICO - VIDEO			
NOTAS: PROCESO DE REPTACIÓN VÍA VEREDA EL ROSARIO – PARTE BAJA DE LA CUENCA. Zona con menores pendientes y acumulación de agua (Presencia de guaduales), vegetación densa. Zonas importantes de pasto para cría de ganado (principal actividad económica de la zona)			

DESCRIPCIÓN:	PR 12	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 2'29.35"N Long: 75°32'6.25"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			



REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 9:29 – 9:54 AM

NOTAS:

PROCESO CARCAVA posible (PG020)

Inicio con un proceso erosivo hace aproximadamente 20 años y en la actualidad aun permanece activo. En la parte superior del escarpe se encuentra viviendas desalojadas entre ellas comercio y una iglesia, debido al inminente riesgo expuesto. En la vía aun se presenta flujo vehicular desde motocicletas y autos hasta camiones de agua y leche. Dicha vía es carreteable pero no tiene estructura de pavimento.

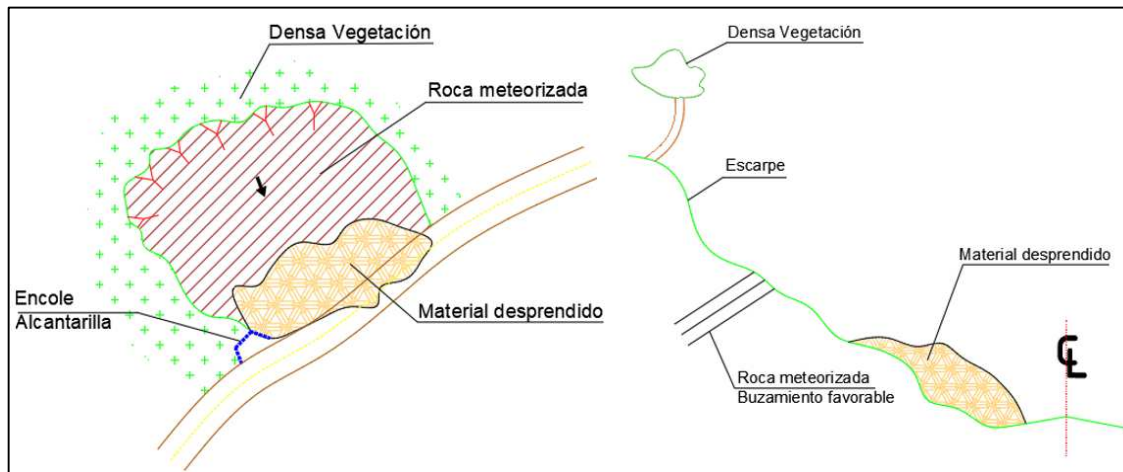
Este proceso hace parte de la cuenca alta de la quebrada El Rosario, donde se encuentran desprendimiento y erosión de materiales volcánicos (Lapilli), vegetación tipo pastos y transporte de caudal en cuerpos de agua de color gris oscuro.

En cuanto obras de estabilización se evidencian anclajes en la parte alta como opción para mantener estable la banca de la vía, sin embargo, algunos ya se encuentran colapsados y el talud presenta grietas horizontales. También se encuentra un muro de contención cimentado sobre pilotes, cabeceado y los elementos profundos desprotegidos y con grietas en concreto y rotura en acero.

La noche anterior al día de la visita se presentó lluvia intensa.

No existe señalización que impida el paso a personas a la zona del escarpe o que limite el tránsito de vehículos de carga pesada.

DESCRIPCIÓN:	PR 13	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 2'39.63"N Long: 75°32'12.95"O
---------------------	--------------	---	--

FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA


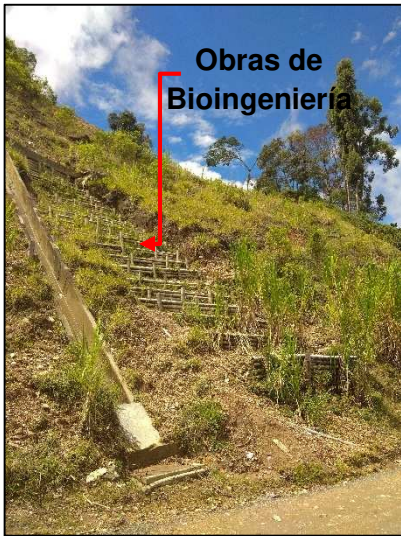
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:14 – 10:19 AM

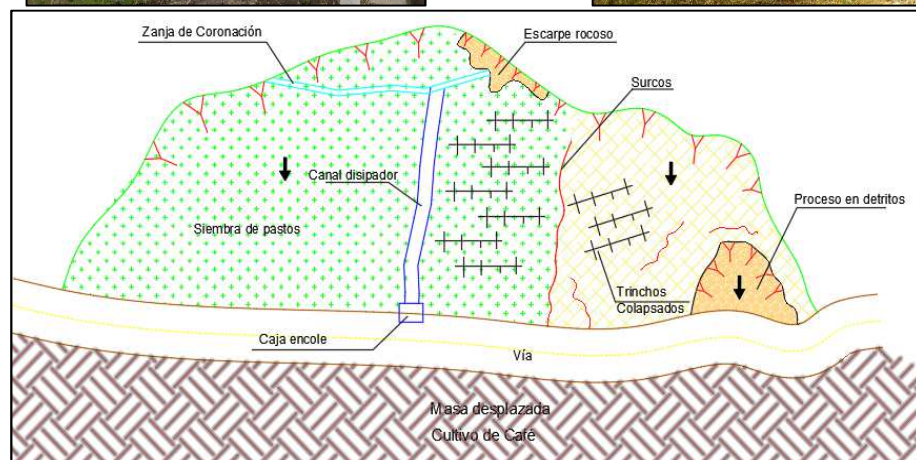
NOTAS:

Proceso inestable reciente (menor a 1 año) con alta presencia de circulación de agua, material expuesto y con grado de meteorización. En la parte superior del escarpe se evidencia sobrecarga por densa vegetación. Sobre cuneta y encole de alcantarilla se encuentra material deslizado.

La estratificación de la roca expuesta presenta un buzamiento favorable a la vía.

DESCRIPCIÓN:	PR 14	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 2'37.85"N Long: 75°32'13.78"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
 			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:20 – 10:35 AM			
NOTAS: Proceso inestable reciente (producto de fuertes lluvias de la noche anterior) con alta presencia de circulación de agua, material orgánico deslizado tipo lodo, obstruyendo cuneta y carril de vía.			

DESCRIPCIÓN:	PR 15	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 2'35.69"N Long: 75°32'15.73"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
 			



REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 10:44 – 10:58 AM

NOTAS:


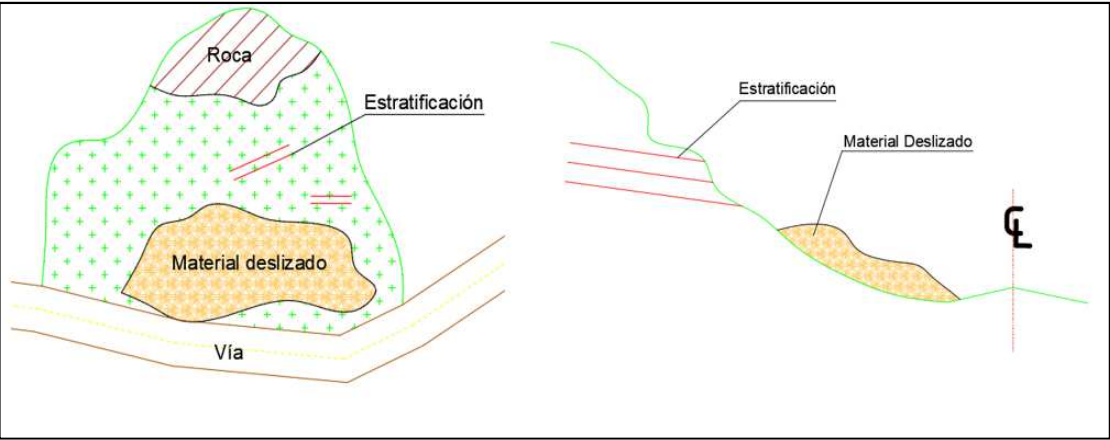
Proceso inestable con presencia de obras de bioingeniería tales como trinchos en guadua, siembra de pastos de las comunidades y obras de drenaje conformadas por canales de coronación, zanjias y canal con disipadores de energía en concreto, elaboradas por Corpocaldas.

Actualmente, algunos trinchos se encuentran colapsados y el material que conforma la ladera de tipo detrito se encuentra bastante húmedo.

La parte alta de este proceso colinda en su parte posterior con el proceso inestable de la Cárcava El Tablazo - PR 12.

El talud de la parte baja de la vía está conformado por material deslizado, sobre el cual la comunidad ha sembrado café.

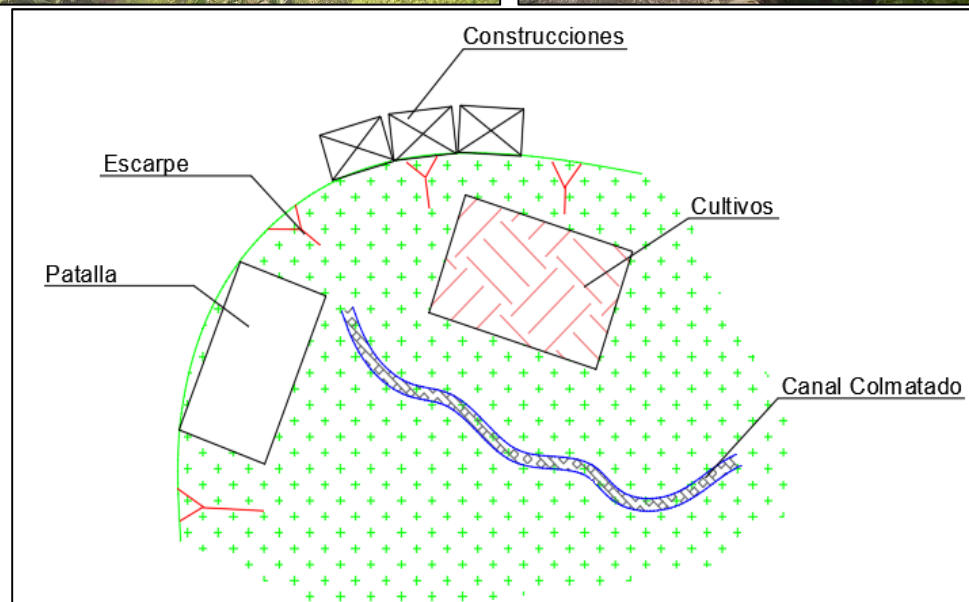
Como antecedente según la comunidad en diciembre de 2011 el proceso presento un deslizamiento que genero acumulación de material del orden de 2,0 a 3,0m de altura.

DESCRIPCIÓN:	PR 16	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: 5° 2'33.79"N Long: 75°32'19.46"O
FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA			
			
			
REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 11:24 – 11:39 AM			

NOTAS:

Proceso inestable reciente en material rocoso (detritos) con alta humedad y estratificación desfavorable. La parte superior del escarpe está cubierta por densa vegetación. La ladera tiene una dirección de 299° N y un Buzamiento de 36° con respecto a la horizontal.

DESCRIPCIÓN:	PR 17	Fecha: Domingo 1/04/18	Lat: $5^{\circ} 0'52.97''$N Long: $75^{\circ}32'55.94''$O
---------------------	--------------	---	--

FOTOGRAFIA Y/O ESQUEMA

REGISTO FOTOGRÁFICO ABRIL HORA 2:54 – 2:59 PM

NOTAS:

Proceso inestable reciente tipo cárcava. En la parte alta del talud se encuentra la sobrecarga producto de construcciones y en la parte baja un canal colmatado. Como obras de contención se evidencia la presencia de pantalla de contención con anclajes pasivos. La ladera tiene presencia de cultivos.

RESUMEN DE LA VISITA DE RECONOCIMIENTO DE CAMPO			CANTIDAD
ESTB	:	Puntos estabilizados con obras de drenaje	1
DSL	:	Descripción suelo	4
PR	:	Proceso nuevo	17
VAP	:	Validación aspecto	9
OD	:	Obra de drenaje	1
VCC	:	Vista cauce	1
CA	:	Cuerpo de agua	1

C. Anexo: Curva de éxito para la clasificación de amenaza de la cuenca de la Quebrada El Rosario

TABLA DE CURVA DE ÉXITO PARA EL ÍNDICE DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS A (LHI A)

ID	PERCENTIL	LHIA_CUENCA	LHIA_CUENCA_NCA_%	LHIA_CUENCA_CA_%AC	LHIA_INESTA	LHIA_INESTA_%	LHIA_INESTA_%AC
0	1.00	230	0.1%	0.1%	71	1.7%	1.7%
1	0.99	2348	0.9%	1.0%	549	13.4%	15.2%
2	0.98	2398	1.0%	2.0%	256	6.3%	21.5%
3	0.97	3200	1.3%	3.3%	345	8.4%	29.9%
4	0.96	2053	0.8%	4.1%	149	3.6%	33.6%
5	0.95	2451	1.0%	5.1%	113	2.8%	36.3%
6	0.94	2216	0.9%	6.0%	74	1.8%	38.1%
7	0.93	2574	1.0%	7.0%	155	3.8%	41.9%
8	0.92	2650	1.1%	8.1%	133	3.3%	45.2%
9	0.91	2723	1.1%	9.2%	108	2.6%	47.8%
10	0.90	3404	1.4%	10.6%	71	1.7%	49.6%
11	0.89	1062	0.4%	11.0%	9	0.2%	49.8%
12	0.88	2730	1.1%	12.1%	44	1.1%	50.9%
13	0.87	2289	0.9%	13.0%	48	1.2%	52.0%
14	0.86	2454	1.0%	14.0%	69	1.7%	53.7%
15	0.85	2547	1.0%	15.0%	52	1.3%	55.0%
16	0.84	3232	1.3%	16.3%	50	1.2%	56.2%
17	0.83	2008	0.8%	17.1%	45	1.1%	57.3%
18	0.82	2267	0.9%	18.1%	49	1.2%	58.5%
19	0.81	2420	1.0%	19.0%	62	1.5%	60.1%
20	0.80	2967	1.2%	20.2%	60	1.5%	61.5%
21	0.79	2037	0.8%	21.1%	39	1.0%	62.5%

ID	PERCENTIL	LHIA_CUENCA	LHIA_CUENCA_%	LHIA_CUENCA_%AC	LHIA_INESTA	LHIA_INESTA_%	LHIA_INESTA_%AC
22	0.78	3108	1.3%	22.3%	54	1.3%	63.8%
23	0.77	1743	0.7%	23.0%	27	0.7%	64.5%
24	0.76	2483	1.0%	24.0%	30	0.7%	65.2%
25	0.75	2582	1.0%	25.0%	8	0.2%	65.4%
26	0.74	3526	1.4%	26.5%	45	1.1%	66.5%
27	0.73	1888	0.8%	27.2%	25	0.6%	67.1%
28	0.72	4634	1.9%	29.1%	109	2.7%	69.8%
29	0.71	0	0.0%	29.1%	0	0.0%	69.8%
30	0.70	2258	0.9%	30.0%	33	0.8%	70.6%
31	0.69	2770	1.1%	31.1%	51	1.2%	71.8%
32	0.68	2251	0.9%	32.0%	10	0.2%	72.1%
33	0.67	2825	1.1%	33.2%	19	0.5%	72.5%
34	0.66	2256	0.9%	34.1%	32	0.8%	73.3%
35	0.65	2475	1.0%	35.1%	47	1.2%	74.5%
36	0.64	3012	1.2%	36.3%	19	0.5%	74.9%
37	0.63	1856	0.7%	37.0%	15	0.4%	75.3%
38	0.62	2412	1.0%	38.0%	32	0.8%	76.1%
39	0.61	2492	1.0%	39.0%	76	1.9%	78.0%
40	0.60	2581	1.0%	40.0%	50	1.2%	79.2%
41	0.59	2852	1.1%	41.2%	16	0.4%	79.6%
42	0.58	2119	0.9%	42.0%	24	0.6%	80.2%
43	0.57	2580	1.0%	43.1%	38	0.9%	81.1%
44	0.56	3186	1.3%	44.4%	25	0.6%	81.7%
45	0.55	1751	0.7%	45.1%	21	0.5%	82.2%
46	0.54	2823	1.1%	46.2%	23	0.6%	82.8%
47	0.53	2020	0.8%	47.0%	5	0.1%	82.9%
48	0.52	2559	1.0%	48.1%	22	0.5%	83.4%
49	0.51	2360	1.0%	49.0%	14	0.3%	83.8%
50	0.50	2508	1.0%	50.0%	25	0.6%	84.4%
51	0.49	2454	1.0%	51.0%	17	0.4%	84.8%
52	0.48	2494	1.0%	52.0%	2	0.0%	84.9%
53	0.47	2540	1.0%	53.0%	26	0.6%	85.5%
54	0.46	2440	1.0%	54.0%	33	0.8%	86.3%
55	0.45	2456	1.0%	55.0%	35	0.9%	87.2%
56	0.44	2504	1.0%	56.0%	8	0.2%	87.4%
57	0.43	2472	1.0%	57.0%	3	0.1%	87.4%
58	0.42	2504	1.0%	58.0%	3	0.1%	87.5%
59	0.41	2447	1.0%	59.0%	52	1.3%	88.8%
60	0.40	2500	1.0%	60.0%	103	2.5%	91.3%

ID	PERCENTIL	LHIA_CUENCA	LHIA_CUENCA_NCA_%	LHIA_CUENCA_%AC	LHIA_INESTATA	LHIA_INESTATA_%	LHIA_INESTATA_%AC
61	0.39	2462	1.0%	61.0%	12	0.3%	91.6%
62	0.38	2558	1.0%	62.0%	18	0.4%	92.0%
63	0.37	2403	1.0%	63.0%	41	1.0%	93.0%
64	0.36	2642	1.1%	64.1%	9	0.2%	93.3%
65	0.35	2999	1.2%	65.3%	11	0.3%	93.5%
66	0.34	1808	0.7%	66.0%	1	0.0%	93.6%
67	0.33	2647	1.1%	67.1%	10	0.2%	93.8%
68	0.32	2317	0.9%	68.0%	1	0.0%	93.8%
69	0.31	2498	1.0%	69.0%	3	0.1%	93.9%
70	0.30	2658	1.1%	70.1%	9	0.2%	94.1%
71	0.29	2391	1.0%	71.0%	9	0.2%	94.3%
72	0.28	2409	1.0%	72.0%	13	0.3%	94.7%
73	0.27	2555	1.0%	73.0%	10	0.2%	94.9%
74	0.26	2443	1.0%	74.0%	32	0.8%	95.7%
75	0.25	2429	1.0%	75.0%	26	0.6%	96.3%
76	0.24	2881	1.2%	76.2%	9	0.2%	96.5%
77	0.23	2542	1.0%	77.2%	7	0.2%	96.7%
78	0.22	2081	0.8%	78.0%	0	0.0%	96.7%
79	0.21	2980	1.2%	79.2%	6	0.1%	96.9%
80	0.20	2122	0.9%	80.1%	5	0.1%	97.0%
81	0.19	2292	0.9%	81.0%	2	0.0%	97.0%
82	0.18	2476	1.0%	82.0%	3	0.1%	97.1%
83	0.17	2500	1.0%	83.0%	8	0.2%	97.3%
84	0.16	2615	1.1%	84.1%	9	0.2%	97.5%
85	0.15	2352	0.9%	85.0%	11	0.3%	97.8%
86	0.14	2600	1.0%	86.1%	13	0.3%	98.1%
87	0.13	2351	0.9%	87.0%	16	0.4%	98.5%
88	0.12	2600	1.0%	88.0%	6	0.1%	98.7%
89	0.11	2402	1.0%	89.0%	6	0.1%	98.8%
90	0.10	2449	1.0%	90.0%	2	0.0%	98.8%
91	0.09	2531	1.0%	91.0%	4	0.1%	98.9%
92	0.08	2443	1.0%	92.0%	12	0.3%	99.2%
93	0.07	2542	1.0%	93.0%	6	0.1%	99.4%
94	0.06	2478	1.0%	94.0%	0	0.0%	99.4%
95	0.05	2430	1.0%	95.0%	5	0.1%	99.5%
96	0.04	2473	1.0%	96.0%	10	0.2%	99.8%
97	0.03	2531	1.0%	97.0%	6	0.1%	99.9%
98	0.02	2436	1.0%	98.0%	0	0.0%	99.9%
99	0.01	2620	1.1%	99.1%	4	0.1%	100.0%

ID	PERC ENTIL	LHIA_C UENCA	LHIA_CUE NCA_%	LHIA_CUEN CA_%AC	LHIA_I NESTA	LHIA_INE STA_%	LHIA_INES TA_%AC
100	0.00	2333	0.9%	100.0%	0	0.0%	100.0%

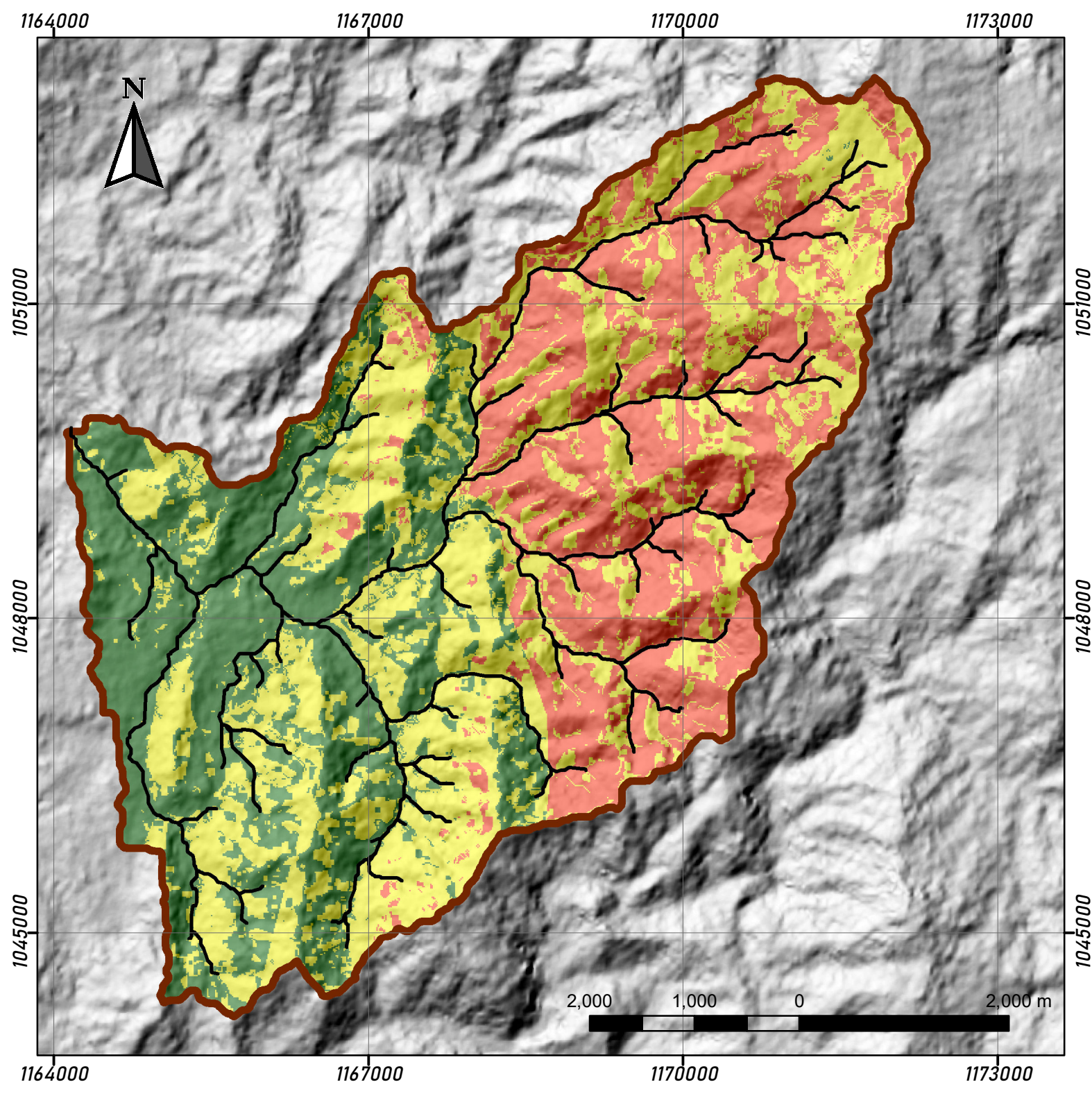
TABLA DE CURVA DE ÉXITO PARA EL ÍNDICE DE AMENAZA POR
DESLIZAMIENTOS B (LHI B)

ID	PERC ENTIL	LHIB_C UENCA	LHIB_CUE NCA_%	LHIB_CUEN CA_%AC	LHIB_I NESTA	LHIB_INE STA_%	LHIB_INES TA_%AC
0	1.00	0	0.0%	0.0%	0	0.0%	0.0%
1	0.99	5616	2.3%	2.3%	883	21.6%	21.6%
2	0.98	7451	3.0%	5.3%	638	15.6%	37.3%
3	0.97	3143	1.3%	6.5%	120	2.9%	40.2%
4	0.96	2017	0.8%	7.3%	98	2.4%	42.6%
5	0.95	1893	0.8%	8.1%	106	2.6%	45.2%
6	0.94	7129	2.9%	11.0%	188	4.6%	49.8%
7	0.93	2929	1.2%	12.2%	52	1.3%	51.1%
8	0.92	2268	0.9%	13.1%	41	1.0%	52.1%
9	0.91	2942	1.2%	14.3%	89	2.2%	54.2%
10	0.90	5173	2.1%	16.3%	81	2.0%	56.2%
11	0.89	4006	1.6%	18.0%	90	2.2%	58.4%
12	0.88	4777	1.9%	19.9%	101	2.5%	60.9%
13	0.87	4037	1.6%	21.5%	72	1.8%	62.7%
14	0.86	5205	2.1%	23.6%	94	2.3%	65.0%
15	0.85	2956	1.2%	24.8%	10	0.2%	65.2%
16	0.84	6698	2.7%	27.5%	99	2.4%	67.6%
17	0.83	4572	1.8%	29.3%	95	2.3%	70.0%
18	0.82	1845	0.7%	30.1%	38	0.9%	70.9%
19	0.81	3044	1.2%	31.3%	41	1.0%	71.9%
20	0.80	2646	1.1%	32.4%	9	0.2%	72.1%
21	0.79	2897	1.2%	33.5%	30	0.7%	72.9%
22	0.78	1691	0.7%	34.2%	27	0.7%	73.5%
23	0.77	1656	0.7%	34.9%	31	0.8%	74.3%
24	0.76	1432	0.6%	35.5%	12	0.3%	74.6%
25	0.75	1189	0.5%	35.9%	11	0.3%	74.8%
26	0.74	2774	1.1%	37.1%	25	0.6%	75.5%
27	0.73	900	0.4%	37.4%	13	0.3%	75.8%
28	0.72	0	0.0%	37.4%	0	0.0%	75.8%
29	0.71	2324	0.9%	38.4%	50	1.2%	77.0%
30	0.70	806	0.3%	38.7%	12	0.3%	77.3%
31	0.69	2761	1.1%	39.8%	46	1.1%	78.4%

ID	PERCENTIL	LHIB_CUENCA	LHIB_CUENCA_%	LHIB_CUENCA_%AC	LHIB_INESTA	LHIB_INESTA_%	LHIB_INESTA_%AC
32	0.68	2584	1.0%	40.8%	44	1.1%	79.5%
33	0.67	3890	1.6%	42.4%	37	0.9%	80.4%
34	0.66	2985	1.2%	43.6%	45	1.1%	81.5%
35	0.65	1999	0.8%	44.4%	8	0.2%	81.7%
36	0.64	0	0.0%	44.4%	0	0.0%	81.7%
37	0.63	5133	2.1%	46.5%	47	1.2%	82.9%
38	0.62	1839	0.7%	47.2%	3	0.1%	82.9%
39	0.61	2095	0.8%	48.1%	21	0.5%	83.4%
40	0.60	2541	1.0%	49.1%	14	0.3%	83.8%
41	0.59	2327	0.9%	50.0%	25	0.6%	84.4%
42	0.58	1942	0.8%	50.8%	15	0.4%	84.8%
43	0.57	2535	1.0%	51.8%	4	0.1%	84.9%
44	0.56	1124	0.5%	52.3%	6	0.1%	85.0%
45	0.55	2223	0.9%	53.2%	28	0.7%	85.7%
46	0.54	2397	1.0%	54.1%	25	0.6%	86.3%
47	0.53	3799	1.5%	55.7%	36	0.9%	87.2%
48	0.52	933	0.4%	56.0%	7	0.2%	87.4%
49	0.51	1784	0.7%	56.8%	2	0.0%	87.4%
50	0.50	1773	0.7%	57.5%	1	0.0%	87.4%
51	0.49	2907	1.2%	58.6%	53	1.3%	88.7%
52	0.48	1485	0.6%	59.2%	15	0.4%	89.1%
53	0.47	2744	1.1%	60.3%	91	2.2%	91.3%
54	0.46	2085	0.8%	61.2%	19	0.5%	91.8%
55	0.45	690	0.3%	61.5%	3	0.1%	91.9%
56	0.44	2908	1.2%	62.6%	31	0.8%	92.6%
57	0.43	1379	0.6%	63.2%	17	0.4%	93.0%
58	0.42	3343	1.3%	64.5%	12	0.3%	93.3%
59	0.41	2281	0.9%	65.5%	8	0.2%	93.5%
60	0.40	1182	0.5%	65.9%	1	0.0%	93.6%
61	0.39	2252	0.9%	66.8%	4	0.1%	93.7%
62	0.38	2229	0.9%	67.7%	7	0.2%	93.8%
63	0.37	3545	1.4%	69.2%	3	0.1%	93.9%
64	0.36	2543	1.0%	70.2%	18	0.4%	94.3%
65	0.35	2423	1.0%	71.2%	12	0.3%	94.6%
66	0.34	3692	1.5%	72.7%	11	0.3%	94.9%
67	0.33	2277	0.9%	73.6%	25	0.6%	95.5%
68	0.32	3383	1.4%	74.9%	33	0.8%	96.3%
69	0.31	2246	0.9%	75.8%	5	0.1%	96.4%
70	0.30	4044	1.6%	77.5%	11	0.3%	96.7%

ID	PERCENTIL	LHIB_CUENCA	LHIB_CUENCA_%	LHIB_CUENCA_%AC	LHIB_INESTA	LHIB_INESTA_%	LHIB_INESTA_%AC
71	0.29	2077	0.8%	78.3%	2	0.0%	96.8%
72	0.28	2864	1.2%	79.5%	7	0.2%	96.9%
73	0.27	2915	1.2%	80.6%	4	0.1%	97.0%
74	0.26	1130	0.5%	81.1%	0	0.0%	97.0%
75	0.25	1149	0.5%	81.5%	1	0.0%	97.1%
76	0.24	1874	0.8%	82.3%	3	0.1%	97.1%
77	0.23	2157	0.9%	83.2%	7	0.2%	97.3%
78	0.22	1273	0.5%	83.7%	7	0.2%	97.5%
79	0.21	989	0.4%	84.1%	2	0.0%	97.5%
80	0.20	1661	0.7%	84.8%	9	0.2%	97.7%
81	0.19	2385	1.0%	85.7%	7	0.2%	97.9%
82	0.18	3139	1.3%	87.0%	24	0.6%	98.5%
83	0.17	2118	0.9%	87.8%	6	0.1%	98.7%
84	0.16	859	0.3%	88.2%	0	0.0%	98.7%
85	0.15	1738	0.7%	88.9%	6	0.1%	98.8%
86	0.14	2740	1.1%	90.0%	2	0.0%	98.8%
87	0.13	1924	0.8%	90.8%	3	0.1%	98.9%
88	0.12	2619	1.1%	91.8%	13	0.3%	99.2%
89	0.11	1727	0.7%	92.5%	4	0.1%	99.3%
90	0.10	2338	0.9%	93.4%	2	0.0%	99.4%
91	0.09	1659	0.7%	94.1%	4	0.1%	99.5%
92	0.08	1952	0.8%	94.9%	1	0.0%	99.5%
93	0.07	2091	0.8%	95.7%	10	0.2%	99.8%
94	0.06	1596	0.6%	96.4%	0	0.0%	99.8%
95	0.05	1056	0.4%	96.8%	6	0.1%	99.9%
96	0.04	1949	0.8%	97.6%	0	0.0%	99.9%
97	0.03	1153	0.5%	98.1%	0	0.0%	99.9%
98	0.02	2496	1.0%	99.1%	4	0.1%	100.0%
99	0.01	1970	0.8%	99.9%	0	0.0%	100.0%
100	0.00	344	0.1%	100.0%	0	0.0%	100.0%

D. Anexo. Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa para la cuenca de la quebrada El Rosario



PROYECTO:
 ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA A PARTIR DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN CUENCAS

CONTIENE:
 MAPA DE AMENAZA POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA EL ROSARIO MANIZALES

CONVENCIONES

- RED DRENAJE
- CUENCA Q. ROSARIO
- AMENAZA PRM**
- ALTA
- MEDIA
- BAJA

ELABORADO POR:
 FRANCISCO SALAS TORRES
 CARLOS RODRÍGUEZ PINEDA

FECHA: 13/11/2018

ESCALA: 1:50.000

MAPA: 1 DE 1

Bibliografía

AGS, A. G. S. (2007a). Commentary on Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Journal and News of the Australian Geomechanics Society*, 42(1).

AGS, A. G. S. (2007b). Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Journal and News of the Australian Geomechanics Society*, 42(1).

AGS, A. G. S. (2007c). Practice Note Guidelines for Landslide Risk Management 2007. *Journal and News of the Australian Geomechanics Society*, 42(1).

Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69.
<https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

Beven, K. J., Kirkby, M. J., Schofield, N., & Tagg, A. F. (1984). Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, 69(1), 119–143. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90159-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90159-8)

Capitani, M., Ribolini, A., & Bini, M. (2013). The slope aspect: A predisposing factor for landsliding? *Comptes Rendus Geoscience*, 345(11–12), 427–438.
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.11.002>

Carrara, A., & Guzzetti, F. (Eds.). (1995). *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Springer Netherlands. Recuperado de <http://www.springer.com/us/book/9780792335023>

CEPAL, BID, & DNP. (2012). Valoración de daños y pérdidas: ola invernal en Colombia 2010-2011. *Instname:Unidad Nacional Para La Gestión Del Riesgo de Desastres*. Recuperado de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19331>

Congedo, L. (2016). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.0.1.1*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1523 de 2012 (2012). Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/24189/390483/11.+LEY+1523+DE+2012.pdf/4e93527d-3bb8-4b53-b678-fbde8107d340?version=1.2>

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., ... Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

Corominas, J., Westen, C. van, Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., ... Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263.

<https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>

CORPOCALDAS, C. A. R. de C., & UNAL, U. N. de C. (2017). Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el departamento de Caldas - POMCA - Chinchiná. Recuperado de

<http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/22612>

CORREA, I. C., & HINCAPIE, L. C. (2010). TOMO 1 – CARACTERIZACION GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA Y ZONIFICACION DE AMENAZAS POR FENOMENOS ASOCIADOS A FLUJOS DE LODO, AVALANCHAS Y LAHARES, PARA EL PLAN PARCIAL EL ROSARIO OCTUBRE DE 2010.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (Eds.). (1996). Chapter 3 - Landslide types and processes. En *Landslides: investigation and mitigation*. Washington, D.C: National Academy Press.

Curvatura—Ayuda | ArcGIS Desktop. (2018). Recuperado el 14 de octubre de 2018, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/curvature.htm>

Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., & Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3), 496–510.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.041>

Decreto 1807. Decreto Número 1807 de 2014, Pub. L. No. Decreto Número 1807 de 2014 (2014). Recuperado de

http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/SRR/decreto_1807_19_%20septiembre_2014.pdf

DeGRAFF, J. V. (1985). Using Isopleth Maps of Landslide Deposits as a Tool in Timber Sale Planning. *Environmental & Engineering Geoscience*, xxii(4), 445–453.

<https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xxii.4.445>

DeGraff, J. V., & Canuti, P. (1988). Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 38(1), 61–71. <https://doi.org/10.1007/BF02590449>

Doane, D. P., & Seward, L. E. (2011). Measuring Skewness: A Forgotten Statistic? *Journal of Statistics Education*, 19(2). <https://doi.org/10.1080/10691898.2011.11889611>

Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., & Leroi, E. (2005). *State of the Art Paper 1 A framework for landslide risk assessment and management*.

- Fell, Robin, Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>
- Fernández, C. I., Del Castillo, T. F., Hamdouni, R. E., & Montero, J. C. (1999). Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(6), 537–544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199906\)24:6<537::AID-ESP965>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199906)24:6<537::AID-ESP965>3.0.CO;2-6)
- Fondo Adaptación. (2014). PROTOCOLO PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LOS POMCA DE ACUERDO CON LOS ALCANCES TÉCNICOS DEL PROYECTO.
- Función de curvatura—Ayuda | ArcGIS for Desktop. (2018). Recuperado el 16 de octubre de 2018, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1), 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Hungr, O., Evans, S., & Hutchinson, I. (2001). A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(3), 221–238.
- Hutchinson, J. N. (1989). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(2), 88. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0)
- IDEAM. (2018). Sistema de Monitoreo de Biomasa y Carbono. Recuperado el 10 de mayo de 2018, de <http://smbyc.ideam.gov.co/MonitoreoBC-WEB/reg/indexLogOn.jsp>
- IGAC, I. G. A. C., & CORPOCALDAS. (2013). Estudio semidetallado de suelos de los municipios de Manizales, Chinchiná, Palestina, Neira, y Villamaría. Escala 1:25.000 Departamento de Caldas.
- Ingeominas. (2001a). Geología de la plancha 205 Chinchiná - Memoria explicativa.
- Ingeominas. (2001b). Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz - Memoria explicativa.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687–711.

Martínez Ardila, N. J., & Murcia García, U. G. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia : Escala 1:100.000*. Bogotá: IDEAM.

Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3–30.

Naranjo Henao, J. L., & Rios Alzate, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista Universidad de Caldas*.

NASA Earth Observatory : Home. (2018, abril 12). [Text.Article]. Recuperado el 13 de abril de 2018, de <https://earthobservatory.nasa.gov/?eocn=topnav&eoci=logo>

Pierson, T. C., Evarts, R. C., & Bard, J. A. (2016). *Landslides in the western Columbia Gorge, Skamania County, Washington* (Report No. 3358) (p. 25). Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/sim3358>

PMA:GCA, P. M. A. G. para las C. A. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas* (Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional,).

Semana. (2017). “Mocoa es hoy un Armero chiquito”: sobreviviente. Recuperado el 18 de marzo de 2018, de <http://www.semana.com/nacion/articulo/mocoa-es-hoy-un-armero-chiquito-sobreviviente/520583>

Sentinel-2 | The Long Term Archive. (2018). Recuperado el 7 de mayo de 2018, de https://lta.cr.usgs.gov/sentinel_2

SGC, S. G. C.-. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. Servicio Geológico Colombiano - SGC. Recuperado de [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)

SGC, S. G. C.-, & UNAL, U. N. de C. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano - SGC. Recuperado de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19776>

Terlien, M. T. J., Westen, C. J. V., & Asch, T. W. J. van. (1995). Deterministic Modelling in Gis-Based Landslide Hazard Assessment. En *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* (pp. 57–77). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_4

TOPMODEL - Caja de Herramientas de Hidrología para POMCAS. (2018). Recuperado el 26 de mayo de 2018, de <https://sites.google.com/site/hydrotoolbox/herramientas/borrador-herramientas/topmodel>

UNISDR. (2009). Terminology on Disaster Risk Reduction. Recuperado de http://ba.one.un.org/content/unct/bosnia_and_herzegovina/en/home/publications/2009-unisdr-terminology-on-disaster-risk-reduction.html

Van Westen, C. J. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. Recuperado de <http://resolver.tudelft.nl/uuid:a59d2eca-ab58-41e6-91c9-01e4e090cf81>

van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, (176), 11–33.

Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Paris: Unesco.

Zuidam, R. A. van. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. The Hague: Smits Publishers.